

Mika Gynther

# LOISTEHON KOMPENSOINNIN NYKYTILA OTAVAN SAHALLA

Opinnäytetyö  
Sähkötekniikan koulutusohjelma


Elokuu 2011




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

# KUVAILULEHTI

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  <b>12.9.2012</b>	
<b>Tekijä(t)</b>  Mika Gynther		<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b>  <b>Sähkötekniikan koulutusohjelma</b>	
<b>Nimeke</b>  Loistehon kompensoinnin nykytila Otavan sahalla			
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Tämän työn pääpaino oli selvittää loistehon kompensoinnin nykytila Otavan Sahalla, jotta ylimääräisiä loistehomaksuja voitaisiin pienentää. Sähkösovimukseen kuuluu yleensä tietty määrä ilmaista loistehoa, joka on suhteutettu pätötehon kulutukseen. Loistehon ilmaismäärä on yleensä 20 % pätötehohuipusta, ylimenevästä osuudesta täytyy maksaa erikseen loistehomaksua.</p> <p>Tutkimus tehtiin Versowood Oy:n konserniin kuuluvalla Otavan sahalla, joka sijaitsee Otavassa, noin kymmenen kilometrin päässä Mikkelistä. Otavan saha on keskijänniteasiakas, ja tehdasalueella sijaitsee viisi jakelumuuntajaa. Muuntajien koot vaihtelivat 800 – 2000 kVA:n välillä. Tutkimuksessa keskityttiin neljään muuntajaan.</p> <p>Tutkimus toteutettiin mittaamalla muuntajien 1-4 syöttämistä pääkeskuksista verkon tila Metrelin Power Quality Analyzer Plus -verkkoanalysaattorilla. Verkkoanalysaattorilla mitattiin lois- ja pätötehot, vaihekohtaiset virrat ja tehokertoimet, jännite- ja virtayliaallot sekä jännitteen ja virran kokonaissäröt. Lisäksi selvitettiin senhetkinen loistehokompensointiparistojen teho pääkeskuksittain.</p> <p>Mittaustulosten mukaan neljästä mitatusta pääkeskuksesta kaksi tarvitsee lisäkompensointia pikaisesti. Yhdessä pääkeskuksessa loistehon kompensointi oli jopa kapasitiivisella puolella suurimman osan ajasta. Kaikilla keskuksilla oli kuitenkin sama ongelma: pätötehohuippujen aikana loistehohuiput nousivat erittäin suuriksi. Kun suuri määrä oikosulkumootoreita käynnistyy samanaikaisesti, ei kompensointiparistojen automaatiikka ehdi lisätä kompensointitehoa riittävän nopeasti.</p>			
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  Loisteho, tehokerroin, kompensointi, muuntaja, yliaallot			
<b>Sivumäärä</b> 66 s. + liite 1 (1 s.)	<b>Kieli</b> Suomi	<b>URN</b>	
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>			
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b>  Arto Kohvakka		<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b>  Versowood Oy, Otavan Saha	

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  12.9.2012	
<b>Author(s)</b> Mika Gynther		<b>Degree programme and option</b> Electrical engineering	
<b>Name of the bachelor's thesis</b>  Reactive power compensation of the current state at Otava sawmill			
<b>Abstract</b>  <p>The aim of the bachelor's thesis was to find out the reactive power compensation of the current state at Otava sawmill, so that the additional payments which results from the reactive power can be reduced. Electrical contract usually includes 20 per cent of free reactive power, which is measured by the amount of active power peak.</p> <p>The study was made at the Otava sawmill, which is part of Versowood group. Otava sawmill is a medium-voltage customer and in the factory area there is located five distribution transformers. The sizes of the transformers various from 800 to 2000 kVA. The study was focused on four transformers.</p> <p>The study was conducted by measuring the status of the electricity network in four central electrical units. The measurement was made by Metrel Power Quality Analyzer Plus-meter. Measured parameters were reactive power, active power, current and power factor for each phase, voltage- and current-harmonics.</p> <p>According to the measurement two central electrical units need more compensation immediately. In one central electrical unit there were signs of overcompensation. In all four central electrical units reactive power peak rose to very high during active power peak. This is because of a large number of induction motors start at the same time and the automation which guides the compensation does not have time to react fast enough.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  Reactive power, power factor, compensation, transformer, harmonics.			
<b>Pages</b> 66 p. + 1 appendix		<b>Language</b> Finnish	
<b>URN</b>			
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>  Arto Kohvakka		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  Versowood Oy, Otavan Saha	

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	TEORIAA TYÖHÖN LIITTYVISTÄ KÄSITTEISTÄ .....	1
2.1	Näennäisteho.....	2
2.2	Pätöteho .....	2
2.3	Loisteho .....	3
2.4	Vaihesiirtokulma.....	4
2.5	Jännite- ja virtayliaallot .....	6
3	LOISTEHO SUURJÄNNITEVERKOSSA .....	9
3.1	Käytössä oleva sähköjärjestelmä .....	9
3.2	Sähkön tuotanto .....	9
3.3	Loisteho generaattorien kannalta .....	9
3.3.1	Epätahtigeneraattorit .....	10
3.3.2	Tahtigeneraattorit .....	11
3.3.3	Tahtigeneraattorit loistehon tuottajina ja kuluttajina .....	11
3.4	Loisteho siirtoverkoissa .....	13
3.4.1	Suurjännitteinen rinnakkaiskondensaattoriparisto .....	14
3.4.2	Rinnakkaiskondensaattorin kytkentäseuraukset .....	15
3.4.3	Rinnakkaiskuristimet eli reaktorit .....	16
3.4.4	Sarjakondensaattorit.....	17
4	KOMPENSOINTI PIENJÄNNITEVERKOSSA .....	19
4.1	Kompensointitavat loistehon kulutuspaikalla.....	19
4.2	Kompensoinnin laiteratkaisut .....	21
4.2.1	Rinnakkaiskondensaattoriparisto .....	22
4.2.2	Estokelaparisto .....	23
4.2.3	Yliaaltosuodattimet .....	24
4.3	Yliaallot pienjänniteverkossa.....	24
4.4	Resonanssit .....	26
5	MUUNTAJA.....	27
5.1	Muuntajien rakenne .....	28
5.2	Muuntajan kytkennät .....	30
5.3	Muuntajan oikosulkuimpedanssi ja oikosulkujännite.....	31
5.4	Tertiäärikäämi .....	33

5.5	Väliottokytkin ja käämikytkin .....	35
6	TUTKIMUKSEN TAVOITTEET .....	36
7	MITTAUSKOHTEET JA MITTAUKSET.....	37
7.1	Pääkeskus PK 1.....	37
7.2	Pääkeskus PK 2.....	38
7.3	Pääkeskus PK 2.1.....	39
7.4	Pääkeskus PK 3.....	40
7.5	Pääkeskus PK 4.....	41
8	TULOKSET .....	41
8.1	Muuntaja T1 ja pääkeskus PK 1 .....	42
8.2	Muuntaja T2 ja pääkeskukset PK 2 ja PK 2,1 .....	45
8.2.1	Pääkeskus PK 2.....	45
8.2.2	Pääkeskus 2.1 .....	47
8.3	Muuntaja T3 ja pääkeskus PK 3 .....	50
8.4	Muuntaja T4 ja pääkeskus PK 4 .....	53
8.5	Yhteenveto loistehon osalta.....	56
8.6	Kompensointitehon lisäys.....	61
9	POHDINTA .....	64
	LIITE	
	1 Kompensoinnin tehokerroin taulukko	

## 1 JOHDANTO

Tämä tutkimus on tehty Versowood Oy Otavan tehtaalla, joka sijaitsee Otavassa, kymmenen kilometrin päässä Mikkelistä. Otavan tehdas kuuluu Versowood-konserniin, joka on Suomen suurimpia, ellei peräti suurin yksityinen puujalostusyritys. Otavassa on pitkät perinteet sahauksesta, sillä Otavassa on ollut saha jo 1890-luvulta lähtien.

Nykypäivän teollisuudessa, etenkin metsäteollisuudessa, jatkuva investointi tuottavampiin laitteisiin on yritysten elinehto ja ainoa keino säilyä mukana kilpailussa muita yrityksiä vastaan. Tämän vuoksi koneista ja laitteista tulee entistä tehokkaampia, ja ne tarvitsevat entistä enemmän sähkövirtaa toimiakseen. Jatkuva koneiden ja laitteiden lisääminen johtaa sähkövirran kulutuksen lisääntymiseen ja siten myös loistehon kulutuksen lisääntymiseen. Tällöin on vaarana, että loistehon kompensointilaitteet eivät pysy kehityksen mukana, ja seurauksena on loistehomaksujen nousu loistehokulutuksen ylitettyä loistehon ilmaisosuus verkosta. Niinpä huolestuttavana asiana sahalla on ollut jatkuva loistehomaksujen nousu. Loistehomaksut ovat olleet suurimmillaan jopa yli 4000 euroa kuukaudessa. Summa oli jo niin suuri, että loistehomaksujen nousun syitä oli syytä tutkia.

Kulutuksen lisääntymisen myötä on herännyt myös kysymyksiä muuntajatehojen riittävyydestä tuleviin investointiin. Sen vuoksi tässä työssä on tehty samoilla mittauksilla kartoitus muuntajien nykyisistä kuormitusvirroista sekä keskuksien yliaalloista.

## 2 TEORIAA TYÖHÖN LIITTYVISTÄ KÄSITTEISTÄ

Tässä luvussa on käsitelty lyhyesti työhön liittyvien sähkösuureiden teoriaa. Sähkön kuluttaja maksaa käyttämästään sähköenergiasta maksua pätötehon mukaan, mutta laitteet käyttävät myös loistehoa. Muuntajan mitoituksessa puhutaan taas näennäistehosta. Lisäksi kuluttajan laitteet saattavat aiheuttaa verkkoon yliaaltovirtoja, jotka synnyttävät verkoston impedansseissa yliaaltotaajuista häiriöjännitettä (Jaatinen 1991, 8).

## 2.1 Näennäisteho

Näennäistehoa käytetään yleensä muuntajien tehoa ilmoitettaessa. Muuntajien nimellisteho  $S_n$  ilmoitetaan nimellisjännitteen ja nimellisvirran tulona (Aura & Tonteri 1996, 22). Näennäistehon yksikkö on VA eli voltiampeeri. Näennäisteho  $S$  saadaan laskemalla kaavan 1 mukaan

$$S = U \cdot I \quad [VA] \quad (1)$$

jossa:

$U$  = nimellisjännite

$I$  = nimellisvirta.

Vaihtovirralla jännitteen ja virran tulo ei ole todellista tehoa, vaan niin sanottua näennäistehoa. Kolmivaihejärjestelmässä näennäisteho on vaihekohtaisten näennäistehojen summa, joka voidaan laskea esimerkiksi kaavan 2 mukaan

$$S_{3v} = S_1 + S_2 + S_3 = 3 \cdot U_v \cdot I_v = U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 \quad (2)$$

jossa:

$S_{1,2,3}$  = ovat vaihekohtaisia näennäistehoja.

$U_{v,1,2,3}$  = vaihejännite

$I_{v,1,2,3}$  = vaihevirta. (Ahoranta 1998, 316.)

## 2.2 Pätöteho

Vaihtosähkön teholla tarkoitetaan yleensä pättötehoa eli keskimääräistä tehoa. Pätötehon suuruus vaihtelee jatkuvasti, koska käytettävä virta ja jännite muuttuvat jatkuvasti. Sähkön kuluttaja käyttää nimenomaan pättötehoa. Vaihtosähkön tehon suuruus ei siis riipu pelkästään jännitteen ja virran suuruudesta, vaan myös niiden välisestä vaihesiirrosta,  $\cos\varphi$ :stä. Vaihtosähkön teho on suurimmillaan, kun jännitteen ja virran välinen vaihesiirto on nolla, eli virta ja jännite ovat samassa vaiheessa. Tällöin  $\cos\varphi$  saa arvon yksi. Mitä suurempi on jännitteen ja virran välinen kulma, sitä pienemmän arvon  $\cos\varphi$  saa, ja sitä pienempi on pättötehon arvo. (Jaatinen 1991, 10, 12.)

Pätötehoa voidaan laskea kaavan 3 mukaan

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad [W] \quad (3)$$

jossa:

$U$  = jännitteen tehollisarvo

$I$  = virran tehollisarvo

$\varphi$  = jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma.

Pätötehon yksikkö on watti W. Wattien määrä saadaan näennäistehosta kertomalla voltiampeerien lukumäärä  $\cos\varphi$ :llä. Kolmivaihejärjestelmässä pätöteho on vaihekohtaisten pätötehojen summa, ja voidaan laskea usealla tavalla, kuten kaavassa 4 on esitetty

$$P_{3v} = P_1 + P_2 + P_3 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot U_v \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

jossa:

$P_{1,2,3}$  = vaihekohtainen kokonaispätöteho

$U$  = pääjännite eli vaiheiden välinen jännite

$U_v$  = vaihejännite eli vaiheen ja nollajohtimen välinen jännite

$I$  = vaihejohtimen virta

$\varphi$  = vaihtojännitteen ja -virran välinen vaihesiirtokulma. (Hieta-Wilkman ym. 2006, 149-150.)

## 2.3 Loisteho

Pätötehon lisäksi laitteet ottavat myös loistehoa toimiakseen. Esimerkiksi oikosulkumoottorin tehokerroin on melko huono,  $\cos\varphi = 0,85-0,90$ , mikä tarkoittaa, että moottori ottaa loistehoa 62-48 % pätötehosta (Elovaara & Haarla 2011a, s.88). Keskimäärin epätahtimoottorit tarvitsevat loistehoa 1 kilovarin pätötehon yhtä kilowattia kohti, mutta esimerkiksi purkauslamppuvalaisimien kuristimet tarvitsevat loistehoa 2 kvar / 1 kW. (Jaatinen 1991, 49-50.)

Tietyt kuormat voivat myös tuottaa loistehoa, esimerkiksi tahtimoottorit. Koska kuormitusten ottama virta lasketaan näennäistehosta, vaikuttaa kokonaisvirtaan myös



loisteho. Siten loistehon siirrosta aiheutuu ylimääräistä energian hukkaa, koska loisteho kasvattaa sähköverkon siirtohäviöitä. Jos kuormitusvirrasta poistetaan loistehokomponentti, verkon pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa, jolloin kokonaisvirrat pienenevät, mikä pienentää pätötehon häviöitä. (Männistö ym. 2006, 82-83.) On syytä muistaa, että loistehon siirrosta aiheutuu myös loistehohäviöitä, etenkin tehomuuntajissa (Jaatinen 1991, 58). Loisteho voidaan laskea esimerkiksi kaavan 5 mukaan

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad [\text{VAr}] \quad (5)$$

jossa:

$\varphi$  = jännitteen ja virran välinenvaihesiirtokulma.

Loistehon yksikkö on vari. Yksi vari on yksi voltiampeeri reaktiivista. Kolmivaihejärjestelmän loisteho voidaan laskea usealla tavalla, kuten kaavassa 6 on esitetty

$$Q_{3v} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = 3 \cdot U_v \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (6)$$

jossa:

$Q_{1,2,3}$  = vaiheiden kokonaisloisteho

$U$  = pääjännite eli vaiheiden välinen jännite

$U_v$  = vaihejännite eli vaiheen ja nollajohtimen välinen jännite

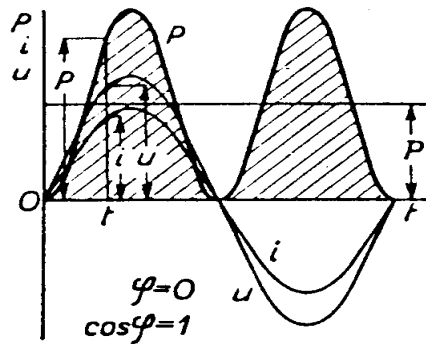
$I$  = vaihejohtimen virta

$\varphi$  = vaihtojännitteen ja virran välinenvaihesiirtokulma. (Hieta-Wilkman ym. 2006, 149-150.)

## 2.4 Vaihesiirtokulma

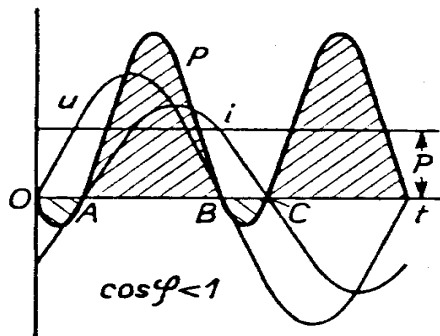
Vaihesiirtokulma  $\varphi$  ilmoittaa vaihtosähkön jännitteen ja virran välisen kulman (Aho-ranta 1998, s.161). Kun vaihesiirto on kapasitiivinen, on vaihesiirtokulma negatiivinen, eli virran kulma on jännitteen kulmaa suurempi, jolloin virta saavuttaa huippunsa ja nolla-arvonsa aiemmin kuin jännite. Vaihesiirron ollessa induktiivinen on vaihesiirtokulma positiivinen, eli jännitteen kulma on virran kulmaa suurempi, jolloin jännite saavuttaa huippunsa ja nolla-arvonsa virtaa aiemmin. Vaihesiirtokulman kosinia kutsutaan tehokertoimeksi. Seuraavassa kuvasarjassa näkyy vaihesiirron vaikutus tehoon.

Kuvassa 1 jännitteen ja virran kulmat ovat samanvaiheiset, jolloin  $\cos\varphi$  saa huippuarvonsa 1 ja teho on suurimmillaan.



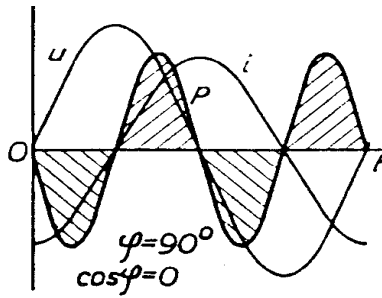
**KUVA 1. Virta ja jännite ovat samanvaiheiset (Jaatinen 1991, 10)**

Kuvassa 2 virran ja jännitteen välillä on vaihesiirtoa, joten  $\cos\varphi < 1$ . Hetkinä, jolloin virta ja jännite ovat erimerkkiset, on teho negatiivinen, välit O-A ja B-C. Muina hetkinä teho on positiivinen. Kuvasta näkyy, kuinka tehon kulkusuunta vaihtelee vuoroin sähkölähteestä kuormitukseen ja vuoroin kuormituksesta sähkölähteeseen päin. Tehon keskiarvo on tässä tapauksessa huonompi, vaikka virta ja jännite ovat samat kuin kuvassa 1. (Jaatinen 1991, 11.)



**KUVA 2. Jännite on virtaa edellä, eli vaihesiirto on induktiivinen (Jaatinen 1991, 11)**

Kuvassa 3 virran ja jännitteen välinen vaihesiirto on  $90^\circ$ , eli  $\cos\varphi = 0$ . Tehon keskiarvo on nyt nolla, koska tehon hetkelliskäyrä heiluu samalla lailla vaaka-akselin molemmilla puolilla. Tehon ollessa positiivinen virtaa tehoa sähkölähteestä kuormitukseen päin sama energiamäärä, kuin mitä virtaa takaisin kuormituksesta sähkölähteeseen päin tehon ollessa negatiivinen. (Jaatinen 1991, 11.)



**KUVA 3. Jännite virtaa edellä 90° eli vaihesiirto 90° (Jaatinen 1991, 11)**

## 2.5 Jännite- ja virtayliaallot

Harmoniseksi yliaaltovirraksi tai -jännitteeksi kutsutaan sinimuotoista jännite- tai virtakomponenttia, jonka taajuus on perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Epäharmonisiksi yliaaltojännitteiksi tai -virraksi kutsutaan sinimuotoisia jännite- tai virtakomponentteja, joiden taajuus ei satu kokonaisluvuilla kerrottuihin perusaallon taajuuksiin. Harmonisia yliaaltojännitteitä ja -virtoja voidaan kuvata harmonisella kokonaissäröllä THD. Standardin SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet- mukaan THD:tä arvioitaessa otetaan mukaan kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40:een asti. (Männistö ym. 2006, 13.) Tässä työssä käytetty mittalaite Metrel Power Quality Analyser Plus on ottanut tulokseen kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 63:een saakka (Metrel PQAPlus käyttö-ohje, 16).

Jännitestandardi SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttö-olosuhteissa viikon aikana 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvon 10 minuutin keskiarvoista tulee olla enintään taulukossa 1 esitetty arvo. Lisäksi jakelujännitteen harmonisen kokonaissärön THD:n tulee olla enintään 8 %, mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40:een saakka. Käytännössä jo 3 %:n jännitesäro saattaa aiheuttaa ongelmia laitteissa (Männistö ym. 2006, 21.)

Pääjännitteen säröprosentti voidaan laskea kaavan 7 mukaan

$$THD - F \% = \sqrt{\left( \frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n}{U_1} \right)^2} \cdot 100 \% \quad (7)$$

jossa:

$U_n$  = harmoninen yliaaltojännite

$U_1$  = perustaajuinen pääjännite.

Taulukossa 1 on esitetty harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka pj-verkolla prosentteina nimellisjännitteestä ja kj-verkolla prosentteina sopimuksen mukaisesta jakelujännitteestä.

**TAULUKKO 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa (Männistö ym. 2006, 22)**

Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6-24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
Kokonaissärö THD 8 %					

Yliaaltovirtojen mittausmenetelmät tulisivat olla samat kuin standardissa SFS-EN 50160 on määritelty mitattaessa jännitteen vaatimuksia. Mittausaika tulee valita siten, että saadaan selville kohteen suurin särövirran 10 minuutin keskiarvo. Mittausnäytteitä voidaan ottaa minuutin välein tai tiheämmin. Keskiarvon tulee kuitenkin muodostua vähintään 10 mittaustuloksesta. Virran säröprosentti voidaan laskea kaavan 7 mukaan, kun korvataan jännitteet virralla.

**TAULUKKO 2. Sallitut yliaaltovirrat pienjänniteasiakkaille (Männistö ym. 2006, 44)**

Referenssivirta	Suositeltava raja	
$\leq 25 \text{ A}$	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita	
$> 25 \text{ A} - 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö max 10 % kokonaisvirrasta	
$> 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö enintään 8 % referenssivirrasta, kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta sallitaan:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 - 16	3,5 %
	17 - 22	2,5 %
	23 - 34	1,0 %
	> 34	0,5 %

Jotta kaikki sähkön käyttäjät olisivat samassa asemassa, on yliaaltovirroille annettu maksimirajat, joita sähkönkäyttäjä saa yhdestä liittymäkohdasta normaalitilanteessa ottaa tai syöttää verkosta. Kaikki sähkönkäyttäjät on saatettu tasapuoliseen asemaan sitomalla osuudet referenssivirtaan. Taulukossa 2 on esitelty suurimmat sallitut yliaaltovirrat pienjänniteasiakkaille ja taulukossa 3 keskijänniteasiakkaille.

**TAULUKKO 3. Sallitut yliaaltovirrat keskijänniteasiakkaille (Männistö ym. 2006, 45)**

Referenssivirta	Suositeltava raja	
Kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 - 16	3,5 %
	17 - 22	2,5 %
	23 - 34	1,0 %
	> 34	0,5 %

Säröjännitettä ja särövirtaa ei yleensä mitata erikseen, vaan jännite- ja virtasärön seuranta on liittymän itsensä tai verkonhaltijan tehtävä toimenpide. Yleensä verkonhaltija on vastuussa jännitteestä ja liittymä virrasta. Eli jos jänniteraja alittuu, mutta virtaraja ylittyy, on sähkönkäyttäjä vastuussa, kun taas jos jänniteraja ylittyy, mutta virtaraja alittuu, on verkonhaltija vastuussa.

### 3 LOISTEHO SUURJÄNNITEVERKOSSA

Tässä kappaleessa on käsitelty loistehon vaikutusta suurjänniteverkossa. Lisäksi on käyty läpi menetelmiä ja laitteita, joilla voidaan vaikuttaa sähkön siirron kapasiteetin parantamiseen. Kappaleessa on käsitelty sähkön siirtoa lähinnä vain loistehon näkökulmasta.

#### 3.1 Käytössä oleva sähköjärjestelmä

Suomessa ja Euroopassa on yleisesti käytössä kolmivaiheinen vaihtosähköjärjestelmä, koska se on edullinen muuntamisen ja moottoreiden käytön kannalta. Järjestelmän jännite ilmoitetaan kahden vaihejohtimen välisen jännitteen arvona. Pienjänniteverkossa järjestelmää käytetään yleensä yksivaiheisesti, jolloin kuormat kytketään yhden vaihejohtimen ja nollajohtimen väliin. Taajuutena Suomessa ja Euroopassa käytetään 50 Hz ja Yhdysvalloissa 60 Hz. (Elovaara-Laiho 1988, 31.)

#### 3.2 Sähkön tuotanto

Sähköä tuotetaan monenlaisissa voimaloissa, kuten vesivoima-, ydinvoima- ja tuuli-voimalaitoksissa, sekä muissa erilaisissa voimalaitoksissa. Suomessa erilaisissa voimaloissa tuotettu sähkö siirretään kuluttajille sähköverkkoa pitkin, johon on kytketty kaikki voimalaitokset ja kuluttajat. Sähköverkkojen tehtävänä on yhdistää toisiinsa tuotanto ja kulutus (Elovaara & Haarla 2011a, 73). Sähköverkko kattaa lähes kaikki taloudet Suomessa, joten siirtomatkat ovat välillä pitkiä. Koska siirron ja jakelun häviöt ovat muotoa  $\approx RI^2$  ja siirrettävä teho muotoa  $\approx UI$ , täytyy sähköä siirtää sitä suuremmalla jännitteellä, mitä suuremmasta siirtotehosta on kyse. (Elovaara & Laiho 1988, 29.)

#### 3.3 Loisteho generaattorien kannalta

Sähköä tuottavissa voimaloissa käytetään voimakoneina usein vesi-, höyry- tai kaasuturbiineja, jotka pyörittävät samalle akselille asennettua generaattoria, jolla tuotetaan sähköä. Generaattorit jaetaan yleensä epätahtigeneraattoreihin ja tahtigeneraattoreihin.

### 3.3.1 Epätahtigeneraattorit

Epätahtikoneen tärkeimmät osat sen toiminnan kannalta ovat seisija, eli staattori ja pyörijä, eli roottori käämityksineen. Ne muodostavat koneen sähköisen toiminnan aktiiviset osat. Muut osat ovat koneen passiivisia osia, jotka pitävät aktiivisia osia paikallaan, sekä johtavat sähkövirran koneeseen tai pois koneesta ja välittävät pyörivän liikkeen eteenpäin. Epätahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii eri nopeudella kuin staattorikäämityksen kehittämä pyörivä magneettikenttä. Yksi yleinen epätahtikone on kolmivaiheinen oikosulkumoottori. (Aura & Tonteri 1986, 146.)

Epätahtikoneita käytetään myös generaattoreina, jolloin sitä kutsutaan epätahtigeneraattoriksi. Moottorikäytössä epätahtikoneen roottori pyörii hitaammin kuin staattorin magneettikenttä, kun taas generaattorikäytössä roottori pyörii nopeammin kuin staattorin magneettikenttä. Epätahtigeneraattorit jaetaan verkkomagnetoituihin ja kondensaattorimagnetoituihin epätahtigeneraattoreihin. Ensimmäistä käytetään esim. pienitehoisissa vesivoimalaitoksissa ja jälkimmäistä esimerkiksi dieselmoottorin käyttämänä. (Aura & Tonteri 1986, 216.)

Verkkomagnetoidussa epätahtigeneraattorissa vaihesiirtokulma on negatiivinen, eli virta on jännitettä edellä. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori toimii niin sanottuna alimagnetoituna generaattorina, joka syöttää verkkoon kapasitiivista loistehoa. Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori on taas niin sanottu itsemagnetoituva, jolloin sen rautaosien pitää olla magneettisesti kyllästyviä. Jotta itsemagnetoituva generaattori herää, täytyy sen roottoriraudassa olla edelliseen käytön jäljiltä jäännösvuo, joka kehittää staattorin vaihekäämeihin pienen jännitteen, joka aiheuttaa virran kondensaattoripiiriin. Tämä kapasitiivinen kuormitusvirta taas magnetoii konetta, jolloin magneettivuot suurenevät. (Aura & Tonteri 1986, 217-219.)

Epätahtikoneilla loisteho on enemmän riippuvainen jännitteestä kuin pätöteho, jos jännite laskee, nousee loistehon kulutus. Epätahtigeneraattorit eivät siten pysty tukemaan verkkoa häiriötilanteissa. Esimerkiksi epätahtigeneraattoreita käyttävien tuulivoimaloiden ominaisuus on, että jännitekuoppa verkossa lisää niiden loistehon kulu- tusta ja siten jännitekuoppa syvenee entisestään. (Elovaara & Haarla 2011a, 139.)

### 3.3.2 Tahtigeneraattorit

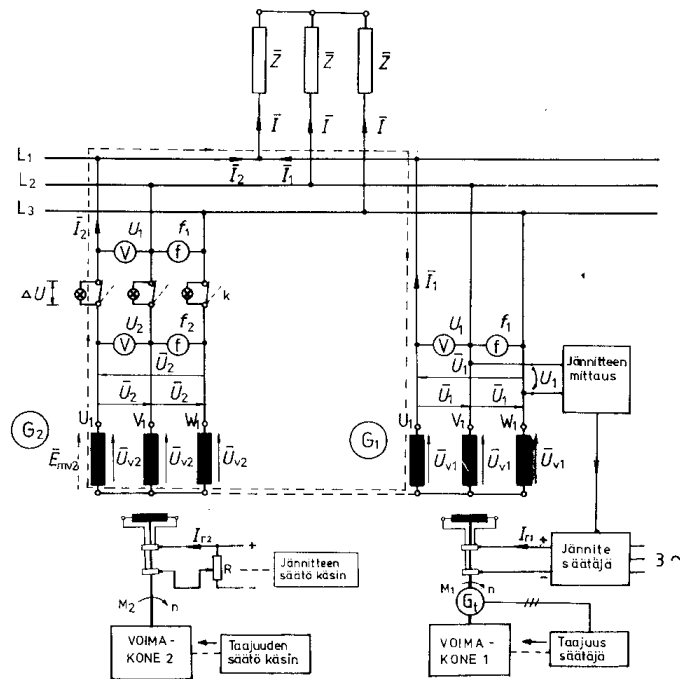
Tahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii tarkalleen samalla nopeudella, eli samassa tahdissa kuin staattorin synnyttämä magneettikenttä pyörii. Tahtikoneen staattori on periaatteessa samanlainen kuin epätahtikoneen staattori, mutta roottorit ovat erilaiset. Tahtikoneen roottori, eli napapyörä on joko umpi- tai avonaparakenteinen. Avonaparakennetta käytetään esimerkiksi vesivoimaloissa, joissa on tehoihin nähden pienet pyörintänopeudet (75...500 1/min taajuuden ollessa 50Hz) ja tehon heilahtelujen vaimentamiseksi vaaditaan suuria hitausmomentteja, jolloin generaattoreiden halkaisijat ovat suuria. Umpinapakoneita käytetään höyry- ja kaasuturpiinilaitoksissa, joissa pyörintänopeudet ovat suuria (3000 1/min taajuuden ollessa 50 Hz), jolloin generaattoreiden halkaisijat ovat pieniä, jotta kehänopeus olisi teknisesti sopiva. (Aura & Tonteri 1986, 241-242.)

### 3.3.3 Tahtigeneraattorit loistehon tuottajina ja kuluttajina

Tahtigeneraattoreita on aiemmin käytetty 110 kV:n verkossa synkronikompensaattoreina, jotka olivat kytketty verkkoon kuormittamattomina. Kun tällaisia generaattoreita yli- tai alimagnetoitiin, voitiin niillä joko tuottaa tai kuluttaa loistehoa tarpeen mukaan. (Elovaara & Haarla 2011b, 225.)

Käytettäessä tahtigeneraattoreita loistehon tuottajina tarvitaan siihen kaksi jännitteelliseen sähköverkkoon kytkettyä tahtigeneraattoria, jotka ovat tahdistettu keskenään. Generaattori  $G_1$  on automaattisesti säädetty, ja se syöttää vakiona pysyvällä jännitteellä  $U_1$  ja taajuudella  $f_1$  kuormitusta  $Z$ , kuten kuvassa 4 on esitetty. Koneiston 1 rinnalle kytketään toinen käsisäätöinen koneisto 2 syöttämään samaa kuormitusta. (Aura & Tonteri 1986, s.262) Kun generaattorit on tahdistettu, on generaattori  $G_2$  verkossa tyhjäkäyntitilaa vastaavassa tilassa. Jos sen halutaan syöttävän verkkoon induktiivista loisvirtaa ja loistehoa, on generaattoria ylimagnetoitava. (Aura & Tonteri 1986, 267.)





**KUVA 4. Tahtigeneraattorit rinnan (Aura & Tonteri 1986, 263)**

Lisättäessä generaattorin  $G_2$  magnetointia suurenee sen päälähdejännite  $E_{mv2}$  (kuva 5) verkon eli generaattorin  $G_1$  liitinjännitettä  $U_{v1}$  suuremmaksi. Tämä aiheuttaa generaattoreiden väliseen vaihepiiriin jännitteen  $\Delta U = E_{mv2} - U_{v1}$ . Generaattoreiden keskinäiseen vaihepiiriin syntyy virta  $I_2$ , joka on verkon kannalta pelkkää induktiivista loisvirtaa. Mitä suurempi on generaattorin  $G_2$  magnetointi, sitä suuremmaksi tulee päälähdejännite  $E_{mv2}$  ja virta  $I_2$  sekä generaattorin  $G_2$  verkkoon syöttämä loisteho  $Q_2$ . Kaikki loisteho, mitä tuotetaan, on myös kulutettava. Tämän vuoksi generaattorin  $G_1$  loisvirran ja loistehon on pienennyttävä, mikäli kuormitustilanne ei muutu. (Aura & Tonteri 1986, 267.)

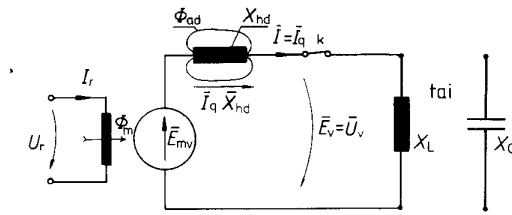
Kuvassa 5 esitetyssä kuvassa on

$\Phi_m$  = pääkenttä,

$\Phi_{ad}$  = kapasitiivisen loisvirran synnyttämä pitkittäinen myötäkenttä eli ankkurivuo

$\bar{U}_v$  = liitinjännite,

$I_r$  = magnetoimisvirta (Aura & Tonteri 1986, 263).



**KUVA 5. Avonapageneraattorin sijaiskytkentä loiskuormalla (Aura & Tonteri 1986, 263)**

Jos tahtigeneraattorilla halutaan tuottaa kapasitiivista loisvirtaa ja loistehoa, täytyy generaattoria vastaavasti alimagnetoida. Kun generaattorin  $G_2$  magnetointia pienennetään, pienenee samalla sen päälähdejännite  $E_{mv2}$  generaattorin  $G_1$  liitinjännitettä  $U_{V1}$  pienemmäksi. Tästä seuraa generaattoreiden keskinäiseen vaihepiiriin jännite  $\Delta U = U_{V1} - E_{mv2}$ .  $\Delta U$  taas aiheuttaa generaattoreiden väliseen vaihepiiriin virran  $I_2$ , kuten induktiivisessakin loistehon säädössä. Virta  $I_2$  on generaattoreiden välisen vaihepiirin kannalta induktiivista loisvirtaa, mutta koska se on jännitteestä  $U_{V1}$  edellä  $90^\circ$ , on se verkon kannalta kapasitiivista loisvirtaa. (Aura & Tonteri 1986, 268.)

### 3.4 Loisteho siirtoverkoissa

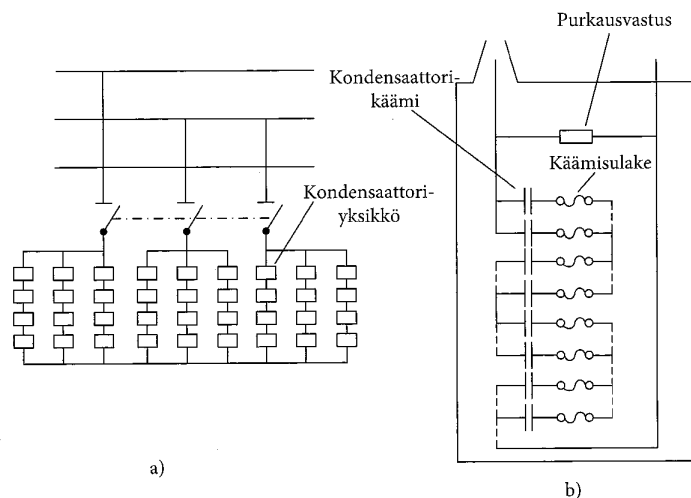
Yleisimmät käytössä olevat siirtoverkkojen jännitteet ovat kaukovoimansiirrossa 400 ja 220 kV:a. Suurjännitejakelussa käytetään 110 kV:a, keskijännitejakelussa 20 kV:a ja pienjännitejakelu suoritetaan 0,4 kilovoltilla (Elovaara-Laiho 1988, s.30). Myös 1000 voltia on alettu käyttää pien- ja keskijännitejakelun välissä (Lohjala 2005, 173-174).

Voimansiirtoverkossa loistehon tasapainoa täytyy jatkuvasti pystyä säätämään. Loistehon tuotantoon käytetään jakeluverkoissa yleensä rinnakkaiskondensaattoriparistoja ja loistehon kulutukseen käytetään rinnakkaiskuristimia eli reaktoreita. Reaktorit kompensoivat pienen kuorman aikana johtojen kehittämän ylimääräisen loistehon. (Elovaara & Haarla 2011b, 225.)

### 3.4.1 Suurjännitteinen rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoreita käytetään siis jakeluverkoissa loistehon tuotantoon, ja ne ovat kytketty 110 kV:n verkkoon mahdollisimman lähelle loistehon kulutuspisteitä. Suurjännitteinen rinnakkaiskondensaattori rakentuu useista rinnan ja sarjaan kytketystä vakiokokoisesta kondensaattoriyksiköstä, joiden mitoitusjännite  $U_R$  on yli 660 V. Siirto- ja jakeluverkoissa kondensaattoriyksiköiden mitoitusjännite  $U_R$  on yleensä  $11/\sqrt{3} \text{ kV} \approx 6,35 \text{ kV}$ , ja mitoisteho  $Q_R$  on 50-250 kvar. Sarjaan kytkettyjen yksiköiden määrä valitaan verkon ja yksikön mitoitusjännitteen mukaan ja rinnankytkettyjen yksiköiden määrä valitaan pariston tehon mukaan. Suomessa 110 kV:n verkossa paristoko on yleensä 20-50 Mvar ja 20 kV:n verkossa 1-5 Mvar. (Elovaara & Haarla 2011b, 228.)

Kondensaattoriyksiköt ovat yleensä yksivaiheisia ja yksinapaisesti eristettyjä, jolloin toinen kytkentäjohto on kytketty kuoreen. Kaksinapaisesti eristetyissä kuori on taas maadoitettu tai liitetty jompaankumpaan napaan, jolloin kuori on jännitteellinen. Jos paristossa on kytketty useita yksikköjä sarjaan, on kuori yleensä aina jännitteellinen, olipa se sitten yksi- tai kaksinapaisesti eristetty. Suomessa kondensaattoriyksiköt suojataan käämikohtaisilla sisäisillä sulakkeilla (kuva 6), jotka irrottavat vioittuneet käämit verkosta. Sisäisten sulakkeiden ansiosta yksikköä voidaan sulakepalosta huolimatta käyttää edelleen ja tehoa menetetään vain noin 2-3 prosenttia. Sisäisistä sulakkeista huolimatta koko paristo on varustettava pääsulakkeilla tai vastaavalla suojauksella. (Elovaara & Haarla 2011b, 228-229.)



**KUVA 6. Suurjännitekondensaattoriparisto a) ja kondensaattoriyksikkö b) (Elovaara & Haarla 2011b, 229)**

Rinnakkaiskondensaattorin tuottama loisteho  $Q$  saadaan laskemalla, kuten kaavassa 8 on esitetty

$$Q = \omega C U^2 = (U/U_R)^2 * Q_R \quad (8)$$

jossa:

$\omega$  = verkon kulmataajuus

$C$  = kondensaattorin kapasitanssi

$U$  = verkon jännite

$U_R$  = kondensaattorin mitoitusjännite

$Q_R$  = kondensaattorin mitoitusteho. (Elovaara & Haarla 2011b, 229.)

### 3.4.2 Rinnakkaiskondensaattorin kytkentäseuraukset

Kytettäessä kondensaattoria verkkoon aiheuttaa se jännitemuutoksia ja resonanssivaaraa. Kun kondensaattori kytketään verkkoon, verkon jännite nousee kaavan 9 mukaan

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_R}{S_k}} \quad (9)$$

jossa:

$U'_1$  = jännite kytkennän jälkeen

$U_1$  = jännite ennen kytkentää

$Q_R$  = pariston mitoitusteho

$S_k$  = verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä. (Elovaara & Haarla 2011b, 231.)

Jos teholtaan liian suuri kondensaattori kytketään verkkoon, saattaa se aiheuttaa jännitteen nousuun liittyvänä valojen äkillistä kirkastumista. Jännitteen nousu rajoitetaan yleensä kolmeen prosenttiin. Kondensaattorin koko tulisi valita siten, ettei resonanssitaajuus  $f_{res}$  osu parittomien kolmella jaottomien, eikä verkkokäskyohjausjärjestelmän käyttämien taajuuksien läheisyyteen. Kondensaattorin ja syöttävän verkon muodostama resonanssitaajuus  $f_{res}$  saadaan laskettua kaavan 10 mukaan

$$f_{\text{res}} = f_0 \sqrt{\frac{S_k}{Q_R}} \quad (10)$$

jossa

$f_0$  = on perustaajuus (50 Hz)

$S_k$  = verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä

$Q_R$  = pariston mitoitusteho.

Rinnakkaiskondensaattorin verkkoon kytkeminen aiheuttaa myös sysäysvirran  $i$ , jonka suuruus voidaan laskea kaavan 11 mukaan

$$i = \sqrt{2} \cdot I_R \sqrt{\frac{S_k}{Q_R}} \quad (11)$$

jossa:

$I_R$  = kondensaattorin mitoitusvirta

$S_k$  = verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä

$Q_R$  = pariston mitoitusteho.

Sysäysvirta suurenee vielä edellistäkin suuremmaksi, jos verkossa olevan pariston tilalle kytketään toinen paristo (Elovaara & Haarla 2011b, 230-231).

Suurjännitekondensaattorit varustetaan yleensä purkausvastuksella, jonka oli aiempien turvallisuusmääräysten mukaan purettava yksikkö mitoitusjännitteestään 50 volttiin viidessä minuutissa. Nykyisin voimassa oleva SFS 6001 standardi vaatii vain purkauslaitteen, mutta ajalle ei ole asetettu mitään rajoituksia. (Elovaara & Haarla 2011b, 229.)

### 3.4.3 Rinnakkaiskuristimet eli reaktorit

Reaktoreilla kompensoidaan pienen kuormituksen aikana johtojen tuottamaa ylimääräistä loistehoa. Suomen kantaverkon kolmivaiheisten reaktoriryhmien teho on 63 Mvar, ja ne ovat kytketty 400/110/20 kV:n muuntajien tertiaarikäämeihin, joissa ne kompensoivat nimenomaan 400 kV:n verkon johtojen tuottamaa loistehoa. Suomessa reaktorit ovat valtaosin ilmasydämissä, mutta muissa maissa käytetään yleensä suoraan

400 kV:n kiskostoon tai jopa kiinteästi pitkään johtoon liitettyjä öljyjäähdytteisiä rautasydämissä reaktoreita. (Elovaara & Haarla 2011b, 225-226.)

Ilmasydämiset reaktorit on koottu kolmesta yksivaiheisesta kelasta, jotka koostuvat samanlaisista sylinterimuotoisista käämeistä. Kolmivaihereaktorit luovat lähialueelleen voimakkaan magneettikentän, jonka leviämistä estetään kytkemällä kompensointireaktorit tähteen ja asentamalla samaan tasoon tasasivuisen kolmion kärkiin. Reaktoreiden indusoituvien silmukkavirtojen estämiseksi täytyy maadoituselektrodit asentaa reaktoreiden läheisyydessä säteittäisesti ja suoja-aidat ja vastaavat rakennelmat tehdä puusta.

Reaktorin kuluttama loisteho  $Q$  voidaan laskea kaavan 12 mukaan

$$Q = (U / U_R)^2 * Q_R \quad (12)$$

jossa

$U$  = verkon jännite

$U_R$  = reaktorin mitoitusjännite

$Q_R$  = reaktorin mitoitusteho. (Elovaara & Haarla 2011b, 226.)

#### 3.4.4 Sarjakondensaattorit

Pitkillä voimansiirtojohdoilla johdon reaktanssi rajoittaa johdon kautta siirrettävän tehon määrää. Jos osa johdon reaktanssista kompensoidaan sarjakondensaattorilla, voidaan johdon reaktanssia pienentää ja täten pätötehon siirtokykyä kasvattaa. Mitä suurempi on sarjakondensaattorilla tehtävä johdon kompensointiaste, sitä lyhyempi on johdon sähköinen pituus. Sarjakondensaattoreita on kantaverkossa nykyisin 7-8 kappaletta, ja ne on kytketty pitkiin pohjois-etelä-suuntaisiin 400 kV:n siirtojohtoihin, kompensointiasteen ollessa 50–70 %, (Elovaara & Haarla 2011b, 226.) eli kuinka paljon johdon induktiivisesta reaktanssista kompensoidaan.

Sarjakondensaattori kytketään johdon kanssa sarjaan, jolloin se pienentää johdon päiden välistä induktiivista reaktanssia. Sarjakondensaattorilla pienennetään johdon päiden välistä kulmaeroa ja johdon kuormittuessa verkosta ottama loisteho pienenee.

Sarjakondensaattorilla tuotettu loisteho seuraa portaattomasti verkossa kulkevan kuormitusvirran suuruuden mukana.

Sarjakondensaattorilla tehtävää kompensointiastetta rajoittaa kompensoinnin vaikutus johdon jänniteprofiiliin, sillä sarjakondensaattorin kohdalla johdon jännite maata vasten nousee äkillisesti ja resaltoiva jännite saattaa ylittää verkon suurimman sallitun käyttöjännitteen. Huomioitavaa on myös se, että sarjakondensaattorin lähellä sattuvien vikojen vikavirrat kulkevat kondensaattorin kautta aiheuttaen ylijännitteitä, jotka täytyy purkaa monimutkaisilla ylijännitesuojauksilla. (Elovaara & Haarla 2011b, 232.)

Sarjakondensaattori ei siis lisää verkon vikavirtatasoa, koska ylijännitesuojauksella rajoitetaan verkon tehollista kompensointiastetta vian aikana (Elovaara & Haarla 2011b, 235).

Sarjakondensaattorit rakennetaan yleensä vaihekohtaisille lavoille (kuva 7), jotka ovat maasta eristetty tukieristimien avulla. Tämä sen vuoksi, koska sarjakondensaattorit kytketään jännitteelliseen johtoon, jonka seurauksena kaikki järjestelmään kuuluvat osat ovat voimajohdon potentiaalissa.



**KUVA 7. Sarjakondensaattoreita lavalla (Nokia Capacitors 2011)**

## **4 KOMPENSOINTI PIENJÄNNITEVERKOSSA**

Loistehon siirto sähköverkossa pienentää pätötehon siirtokykyä ja lisää johtojen ja muuntajien energiahäviöitä kokonaiskuormitusvirran ollessa suurempi. Kokonaiskuormitusvirran pieneneminen vähentää taas kaapeleiden, muuntajien ja moottorien kuumenemista, mikä taas jatkaa niiden elinikää ja vähentää niiden häviöitä. Loistehon siirtomäärän pienentäminen saattaa myös lykätä verkon vahvistus- tai uusinvestointia eteenpäin. Tämän vuoksi loissähkö tulisi tuottaa mahdollisimman lähellä kulutuspaikkaa. (Männistö ym. 2006, 20.)

### **4.1 Kompensointitavat loistehon kulutuspaikalla**

Vaiheensiirtokondensaattoreilla kehitetään esimerkiksi purkauslamppuvalaisimien kuristimien ja induktiomootoreiden tarvitsema magneetoimisteho, joka on induktiivista loistehoa. Myös muuntajan magneettikentän ylläpitämiseen tarvitaan loistehoa. Kompensointi kulutuspaikalla voidaan tehdä kojekohtaisella kompensoinnilla, ryhmäkohtaisella kompensoinnilla tai keskitetyllä kompensoinnilla. (Jaatinen 1991, 66.)

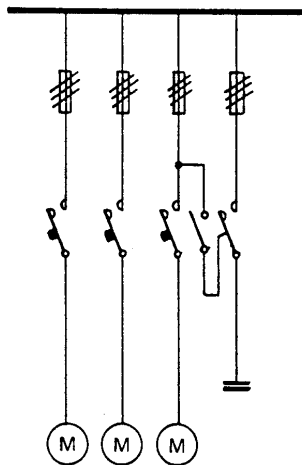
Kojekohtaisessa kompensoinnissa jokaiselle laitteelle asennetaan oma kondensaattori, tällaista kompensointia käytetään yleensä moottoreille ja valaisimille. Moottorikohtaisessa kompensoinnissa kondensaattori kytketään moottorin tai moottorin käynnistimen liittimiin. Valaisimien kondensaattorit ovat yleensä kytketty valaisimiin jo valaisintehtaalla. Kojekohtaisen kompensoinnin etuna on kondensaattorin automaattinen poiskytketyminen kun laitetta ei käytetä. (Jaatinen 1991, 66.) Kuvassa 8 kondensaattoriparistot ovat kytketty moottorien käynnistimien liittimiin.





**KUVA 8. Kondensaattorit ovat kytketty moottorien käynnistimien liittimiin**

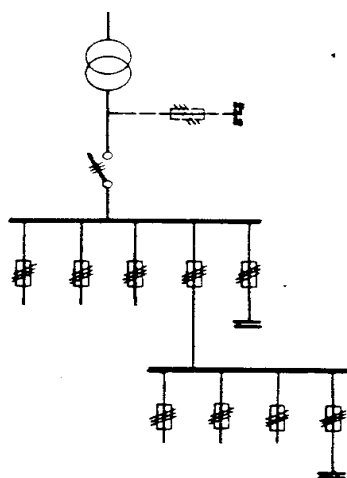
Ryhmäkompensointia käytetään valaisin- ja moottoriryhmien (kuva 9) kompensointiin yhteisellä kondensaattorilla ryhmäkohtaisesti. Valaisimien osalta ryhmäkompensointi sopii erityisesti 3-vaiheisten kontaktoriohjattujen valaisinryhmien kompensointiin, koska tällöin kondensaattori voidaan sijoittaa sopivaan paikkaan kuumenemis- ja huoltonäkökohdat huomioon ottaen. (Jaatinen 1991, 72-73.)



**KUVA 9. Moottoriryhmän kompensointi (Jaatinen 1991, 75)**

Keskitetyssä kompensoinnissa kondensaattorit on asennettu pääkeskuksiin (kuva 10). Keskitettyä kompensointia käytetään usein kojekohtaisen tai ryhmäkompensoinnin lisäksi riittävän kompensointiasteen saavuttamiseksi,  $\cos\varphi \geq 0,97$ . Käytettäessä kiin-

teitä kondensaattoriyksiköitä loistehoa tuotetaan jatkuvasti, vaikka kulutuspaikka ei sitä joka hetki tarvitsisikaan. Tällöin loistehoa saatetaan tuottaa yli oman käytön, jolloin ylimääräinen loisteho siirtyy muuntajan kautta valtakunnan verkkoon. Jakelu- ja muuntajien loistehon kulutus tyhjäkäynnillä on 1-2 % ja täydellä kuormalla 6-15 % muuntajan nimellistehosta. Ylikompensoinnin haitat vältetään käytännössä siten, että ei asenneta kondensaattoreita muuntajan pienjännitepuolelle enempää kuin 15-20 % muuntajan nimellisjännitetehtä. On myös mahdollista ja suositeltavaa käyttää automatiikkaparistoja, jossa säädin kytkee kondensaattoreita verkkoon ja siitä pois loistehon tarpeen mukaan. (Jaatinen 1991, 76-77.)



**KUVA 10. Kiinteät kondensaattorit pääkeskuksissa (Jaatinen 1991, 77)**

## 4.2 Kompensoinnin laiteratkaisut

Kompensoinnissa käytettävien laitteiden valinta riippuu esimerkiksi käytetäänkö laite-, ryhmä- vai kojekohtaista kompensointia, tarvitaanko yliaaltosuodatusta tai kompensoidaanko induktiivista vai kapasitiivista loistehoa. Pienjännitteiset kondensaattoriyksiköt on nykyisin valmistettu yleensä itseparantuvasta metalloidusta polypropyleenikalvosta, jolloin läpilyönti elementissä aiheuttaa metallointikerroksen höyrystymisen ja elementin jäämisen oikosulkuun. Elementit ovat nykyisin rakenteeltaan täysin kuivia, eivätkä sisällä mitään kyllästysnestettä. Jokainen elementti varustetaan sisäisellä suojalla ylivirtaa, ylikämpöä ja ylipainetta vastaan. (Männistö ym. 2006, 48.)

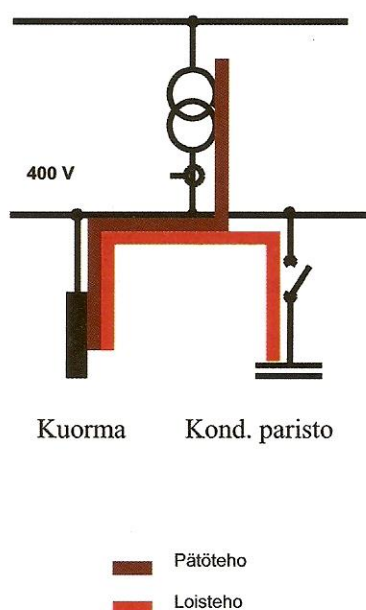
Pienjänniteyksiköt koostuvat rinnankytketyistä elementeistä, joiden yksikkökoot vaihtelevat 2,5-100 kvar. Yksiköt ovat 3-vaiheisia ja sisäisesti kolmioon tai tähteen kytket-

tyjä nimellisjännitteen ollessa 400, 525 tai 690 V. Aiemman sähköturvallisuusmääräyksen mukaan alle 660 V:n nimellisjännitteisen kondensaattoriyksikön varauksen oli purkauduttava 50 volttiin irtikytkemisen jälkeen 60 sekunnissa. Nykyisen SFS-EN 60204-1 standardin mukaan yli 60 voltin jännitteisten osien jäännösjännite on purettava 60 volttiin 5 sekunnissa syötön katkaisun jälkeen. Purkaminen hoidetaan sisäisellä purkausvastuksella. (Männistö ym. 2006, 48-49.)

#### **4.2.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto**

Rinnakkaiskondensaattoriparistot jaetaan kiinteisiin ja säädettäviin yksiköihin, jotka molemmat kytketään kuorman kanssa rinnan, kuten kuvassa 11 on esitetty. Kiinteä paristo kytketään verkkoon ilman säätömahdollisuutta, joten paristo kehittää verkossa loistehoa jatkuvasti, vaikka kulutuspaikka ei sitä joka hetki tarvitsisikaan.

Säädettävissä paristoissa verkkoon kytkettyä kondensaattoritehoa pystytään säätämään kulutuspaikan tarpeen mukaan. Ohjausyksikkö mittaa syötöstä virtamuuntajan avulla kuormitusten loistehon tarvetta, ja kytkee paristoja päälle ja pois kulutuspaikan tarpeen ja aseteltujen havahtumisrajojen mukaan. On syytä muistaa, että mikäli havahtumisrajat ovat liian pienet, alkaa säädin pumpata paristoja päälle ja pois. Säädettäviä automaattikaparistoja käytetään lähinnä keskitettyyn kompensointiin ryhmä- ja pääkeskuksissa. Rinnakkaiskondensaattoriparistot ovat sopiva ratkaisu silloin, kun verkossa ei esiinny merkittävästi yliaaltoja. Rinnakkaiskondensaattoriparistot ovat myös helposti laajennettavissa. (Männistö ym. 2006, 49-50.)



**KUVA 11. Rinnakkaiskondensaattoripariston toimintaperiaate (Männistö ym. 2006, 50)**

#### 4.2.2 Estokelaparisto

Jos verkossa esiintyy merkittävästi yliaaltoja, saattaa pelkän rinnakkaiskondensaattoripariston käyttö aiheuttaa haitallisia resonansseja kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välillä. Kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja verkon induktanssit saattavat muodostaa rinnakkaisresonanssipiirin, jossa viritystaajuuden sattuessa jollekin olemassa olevan yliaaltotaajuuden kohdalle, saattaa tämäntaajuiset virrat vahvistua jopa 20 kertaiseksi. Resonanssin aiheuttama virtasärön nousu aiheuttaa myös jännitesärön nousun. Tämän vuoksi, jos verkon jännitteen harmoninen kokonaissärö on yli 3 %, tulisi käyttää estokelaparistoa. (Männistö ym. 2006, 49-50.)

Estokelaparistossa jokainen porras koostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkenästä, jotka muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka taajuus on viritetty alemmaksi kuin verkossa esiintyvä pienin harmoninen yliaaltotaajuus. Viritystaajuutensa alapuolella paristo on kapasitiivinen eli tuottaa loistehoa ja viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen, jolloin se ei vahvista yliaaltoja. Estokelaparistolla on myös yliaaltoja suodattavaa vaikutusta, mikä riippuu kompensoinnin tehosta ja viritystaajuudesta. Viritystaajuus tulee valita verkossa esiintyvien merkittävimpien yliaaltojen mukaan. Jos käytetään viritystaajuutena esimerkiksi 189 Hz:ä, suodattaa estokelapa-

risto noin 10–30 % viidennen yliaallon määrästä. Estokelaparistoja käytetään yleensä laite- tai ryhmäkohtaiseen kompensointiin. (Männistö ym. 2006, 53.)

### 4.2.3 Yliaaltosuodattimet

Passiiviset yliaaltosuodattimet sisältävät kondensaattoreita ja niiden kanssa sarjaan kytketyn kuristimen. Kuristin muodostaa kondensaattoreiden kanssa sarjaresonanssi-piirin, jolloin suurin osa yliaalloista kulkeutuu suodattimeen, lisäksi sillä voidaan tuottaa haluttu loisteho. Sarjaresonanssi-piirejä on yleensä kolme, jotka on viritetty taajuuksille 5., 7. ja 11 harmoninen yliaalto. (Männistö ym. 2006, 55.)

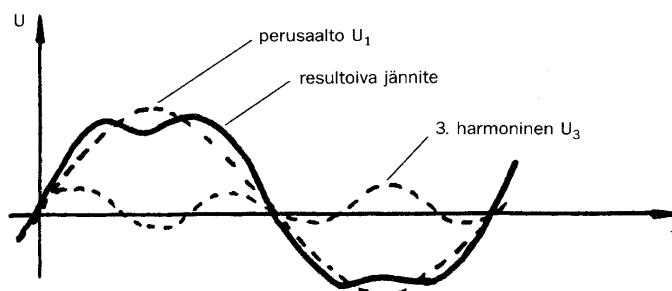
Nykyisin on markkinoille tullut myös puolijohdetekniikalla valmistettuja aktiivisia suodattimia. Aktiiviset suodattimet mittaavat virran yliaaltokomponentit ja tuottavat niiden kanssa 180°:n vaihesiirrossa olevan virran, jolla kumotaan alkuperäinen yliaaltovirta. Jos kuorman yliaaltovirrat ylittävät aktiivisuodattimen kapasiteetin, ei suodatin ylikuormitu, vaan jättää kapasiteettinsa ylimenevän osan kompensoimatta. Aktiivisuodatin on ohjattu virtalähde, joka toimii samalla periaatteella kuin taajuusmuuttajat ja se voidaan asentaa mihin tahansa verkkoon. (Männistö ym. 2006, 62.)

## 4.3 Yliaallot pienjänniteverkossa

Sähkövoimajärjestelmässä kuormitusten oletetaan olevan virran ja jännitteen suhteen lineaarisia. Sähköverkkoon liitetyt laitteet ovat kuitenkin harvoin lineaarisia sähköisiltä ominaisuuksiltaan. Virran ja jännitteen epälineaariset kuormitukset aiheuttavat syöttävään sähköverkkoon yliaaltoja. Merkittävimpiä yliaaltojen aiheuttajia ovat esimerkiksi valokaariuunit, hitsauskoneet ja erilaiset suuntaajakäytöt, kuten taajuusmuuttajat. Pieninä yliaaltolähteinä mainittakoon televisiot ja tietokoneet. Yliaaltovirrat jakaantuvat verkon haaroissa impedanssien mukaan, joten yliaaltojen kulkua verkossa on mahdotonta arvioida etukäteen, koska verkon impedansseja eri taajuuksilla ei tunneta. Yliaaltojen määrään verkon eri kohdissa vaikuttavat yliaaltojen jakautuminen, summautuminen, resonanssit, vaimentuminen ja suodatus. (Jaatinen 1991, 24-26.)

Resistanssi pysyy taajuuden muuttuessa vakiona, mutta reaktanssien kaavoissa vaikuttaa taajuus  $f$ , joten niiden vaikutus impedansseihin muuttuu taajuuden mukaan.

Verkossa kulkevat yliaaltovirrat synnyttävät jännitteen yliaaltoja kohdatessaan verkoston impedanssin. Jännitteen yliaallot aiheuttavat jännitteen käyrämuodon säröytymistä ja siten jännitehäviöitä. Kuvassa 12 on esitetty 3. yliaallon (150 Hz) ja perusaallon (50 Hz) käyrämuodostusta yliaaltomäärän ollessa noin 20 %. (Jaatinen 1991, 32.)



**KUVA 12. Jännitteen 3. yliaalto (Jaatinen 1991, 32)**

Yliaallot aiheuttavat jakeluverkkoon lisähäviöitä ja ylijännitteitä. Laitteille yliaallot aiheuttavat lisälämpenemistä, laitevaurioita sekä vääntömomentin muuttumista. Yliaallot lyhentävät esimerkiksi televisioiden ja tietokoneiden elinikää rasittamalla niiden herkkiä komponentteja, kuten transistoreita ja kondensaattoreita.

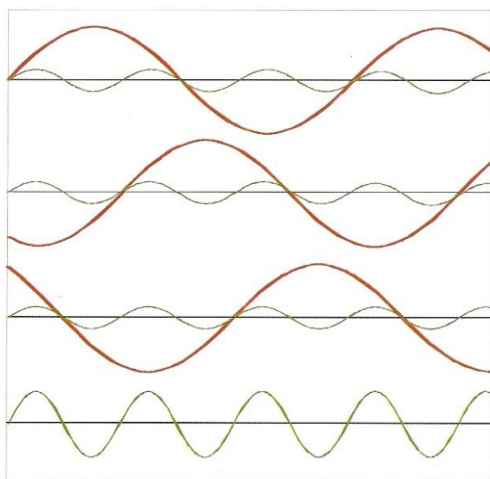
Taulukossa 4 on esitetty 9 ensimmäisen harmonisten yliaaltojen moottoreiden vääntömomentille aiheuttamia muutoksia, lisäksi tulevat vielä ääni- ja värähtelyilmiöt. Yliaallot järjestysluvultaan  $3n+1$  lisäävät hieman vääntömomenttia, eli niiden vaikutus pyörimissuuntaan on taulukon mukaan positiivinen, jolloin magneettikenttä pyörittää moottoria samaan suuntaan kuin perusaalto, ja syntyy lisälämpimistä. Yliaallot  $3n-1$  pienentävät vääntömomenttia, eli niiden vaikutus on taulukon mukaan negatiivinen, jolloin magneettikenttä yrittää jarruttaa moottoria, ja syntyy lisähäviöitä. Nolla vaikutuksella yliaallot kuormittavat nollajohtoa. (Männistö ym. 2006, 34.)

**TAULUKKO 4. Yliaaltojen vaikutus moottorien pyörimiseen**

Yliaallon järjestysluku	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus Hz	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Vaikutus pyörimissuuntaan	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Perustaajuinen symmetrinen kuormitus ei kuormita pienjänniteverkon nollajohdinta lainkaan. Epäsymmetrinen kuormitus kuormittaa nollajohdinta enintään eniten kuormitetun vaihejohtimen verran. Kolmella jaottomat yliaallot kuormittavat nollajohdinta samalla tavalla kuin virran perusaalto, mutta kolmella jaolliset yliaallot saattavat kuormittaa nollajohdinta jopa vaihevirtaa suuremmalla virralla. Tämä johtuu siitä, että kolmannet harmoniset yliaaltovirrat eivät summaudu nolaksi verkon tähtipisteessä, vaan summautuvat nollajohtimeen jolloin nollajohtimessa alkaa kulkea kolmas harmoninen yliaaltovirta. (Männistö ym. 2006, 32.)

Kuvassa 13 on esitetty, kuinka vaihejohtimien kolmannet yliaaltovirrat ovat samanvaiheisia ja summautuvat nollajohtimeen kolminkertaistaen virran amplitudin vaihejohtimen virran amplitudiin nähden.



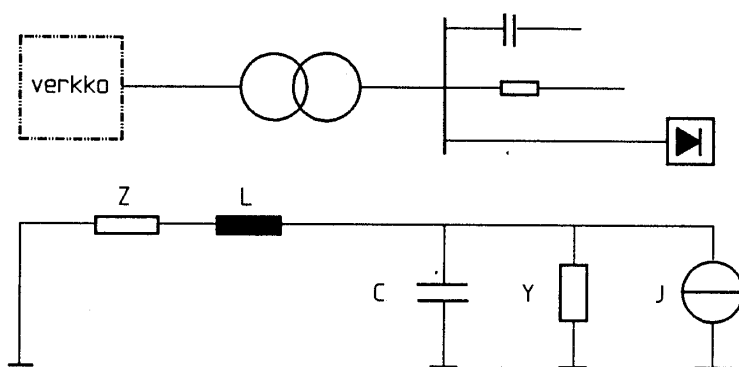
**KUVA 13. Vaihejohtimien yliaaltovirtojen summautuminen nollajohtimeen (Männistö ym. 2006, 33).**

#### 4.4 Resonanssit

Resonansseja esiintyy sarja- ja rinnakkaisresonansseina, joista rinnakkaisresonanssi on yleisempi ja haitallisempi, etenkin jos piirissä on suuntaajakäyttöjä. Kun suuntaajan rinnalle kytketään kondensaattori, muodostuu verkon ja muuntajan induktanssin ja kondensaattorin kapasitanssin muodostama rinnakkaisresonanssiipiiri, johon suuntaajasta tulee yliaaltovirtoja. Jokaisella yliaaltotaajuudella virta  $I$  on yhtä suuri kuin vastaava suuntaajan virran yliaaltokomponentti ja admittanssi  $Y$  on yhtä suuri kuin suuntaajan rinnalla olevan kuormituksen admittanssi kyseisellä taajuudella. Resonanssitilanteessa piirin impedanssi on suuri jonka vuoksi piirin yli vaikuttava jännitesärö on

suuri. Tämän seurauksena piirissä kulkee suuri kiertävä virta, joka aiheuttaa verkkoon jännitesäröä ja ylikuormittaa kondensaattoreita. Rinnakkaisresonanssissa piirissä vaikuttava virta voi olla moninkertainen piiriin tulevaan virtaan nähden. (Jaatinen 1991, 29.)

Pienjänniteverkossa virrat vahvistuvat tyypillisesti 1-5 ja keskijänniteverkossa jopa 10-20 kertaiseksi. Kuvassa 14 on esitetty rinnakkaisresonanssin sijaiskytkentä, jossa yliaaltolähdettä on kuvattu ideaalisella virtalähteellä J ja sisäisellä admittanssilla Y.



**KUVA 14. Rinnakkaisresonanssin sijaiskytkentä (Jaatinen 1991, 29).**

## 5 MUUNTAJA

Muuntajan keksiminen on aikoinaan aiheuttanut sen, että vaihtosähkö on syrjäyttänyt tasasähkö, koska muuntaja toimii vain vaihtosähköllä. Muuntaja on siis laite, joka vaihtosähköjärjestelmässä muuntaa ja myös säätelee jännitteitä ja virtoja kahden tai useamman käämityksen avulla käyttäen hyväkseen sähkömagneettista induktiota. Auran ja Tonterin mukaan (1996, 7) muuntajat jaotellaan voimamuuntajiin, suojamuuntajiin ja mittamuuntajiin. Voimamuuntajilla muunnetaan jännite  $U_1$  jännitteeksi  $U_2$  sähköenergian siirrossa tarpeen mukaan. Suojamuuntajien tehtävänä on eristää jokin sähkölaite yleisestä sähköverkosta. Mittamuuntajien tehtävänä on muuntaa jännite tai virta sopivaksi mittalaitteille tai releille. Mittamuuntajat jaetaan jännite- ja virtamuuntajiin. Voimamuuntajat voidaan vielä jakaa suurtehomuuntajiin ja pientehomuuntajiin, jälkimmäisiä kutsutaan myös jakelumuuntajiksi. Jakelumuuntajiin lasketaan kuuluvaksi muuntajat, joiden yläjännitepuolen nimellisjännite  $U_{1n}$  on  $\leq 20\,000$  voltia ja alajänni-



tepuolen nimellisjännite  $U_{2n} = 400$  voltia, sekä teho  $S_n$  on  $\leq 3150$  kVA. Jakelumuuntajat jaetaan taas rakenteensa puolesta paisuntasäiliöllisiin öljyeristeisiin jakelumuuntajiin, hermeettisiin jakelumuuntajiin, valuhartsieristeisiin jakelumuuntajiin ja pylväsmuuntajiin. (Aura & Tonteri 1986, 79-80.)

## 5.1 Muuntajien rakenne

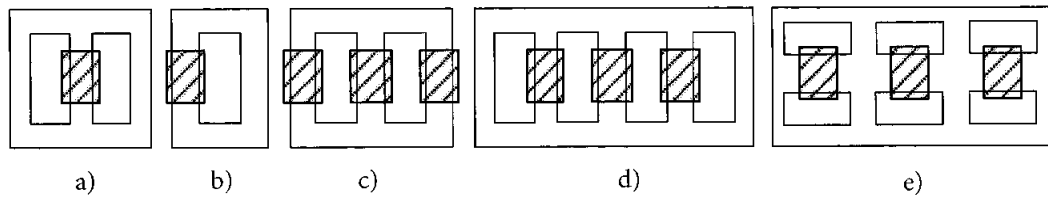
Suurissa ulko- ja sisä-asenteisissa muuntajissa käytetään edelleen eristeenä paperia, prespaania ja muuntajaöljyä, joka toimii myös jäähdytysväliaineena siirtäen käämien ja sydämen kehittämän lämmön muuntajan pintaan. Hermeettisesti suljetut muuntajat eroavat tavallisista öljytäytteisistä muuntajista siten, että muuntajissa ei ole paisuntasäiliötä, vaikka ne ovat täynnä öljyä. Säiliön jäähdytysaallot ovat elastisia joten ne mukautuvat käytön lämpötilan aiheuttamiin öljytilavuuden muutoksiin. Säiliö on niin vahva, että se kestää ylikuormituksenkin aiheuttaman ylipaineen. Kuivamuuntajien eristeaineena käytetään hartseja tai vastaavia aineita, joten ne soveltuvat käytettäväksi paikkoihin, jossa palovaaran, saastumisvaaran tms. takia nestetäytteisen muuntajan käyttöä täytyy välttää. Kuivamuuntajia käytetään lähinnä jakelujännitteillä. On olemassa myös  $SF_6$  kaasulla tai palamattomalla nesteellä täytettyjä muuntajia. (Aura & Tonteri 1986, 82.)

Muuntaja-astia on yleensä rakennettu sitkeästä ja lujasta teräslevystä. Muuntajan rautasydämet taas valmistetaan yleensä 0,23 - 0,35 mm:n vahvuisesta kylmävalssatuista eli kidesuunnatuista sydänlevyistä, jotka voivat olla laserkäsiteltyjä häviöiden pienentämiseksi. Jakelumuuntajia on alettu valmistaa myös niin sanotusta amorfisesta sydänlevymateriaalista, jossa kiderakenne puuttuu kokonaan, jolloin häviöt ovat entistäkin pienemmät. Suurien muuntajien käämit on yleensä valmistettu kuparista, mutta jakelumuuntajan käämit voidaan valmistaa myös alumiinista. (Elovaara & Haarla 2011b, 141 - 142.)

Sydänrakenteensa perusteella muuntajat jaetaan sydänmuuntajiin ja vaippamuuntajiin. Rakenteiden välinen ero riippuu siitä, millainen kulkutie nollavuoroisella magneettivuolla on. Esimerkiksi kolmipylväinen kolmivaihemuuntaja on sydänmuuntaja, ja viisipylväinen kolmivaihemuuntaja on jo eräänlainen vaippamuuntaja, tai ainakin vaippa- ja sydänmuuntajan sekamuoto. Viisipylväinen muuntajasydän voidaan yleensä rakentaa matalammaksi kuin kolmepylväinen, mistä voi olla joskus etua. Yksivaihei-

set muuntajat toimivat aina vaippamuuntajan tavoin. (Elovaara & Haarla 2011b, 142 - 143.)

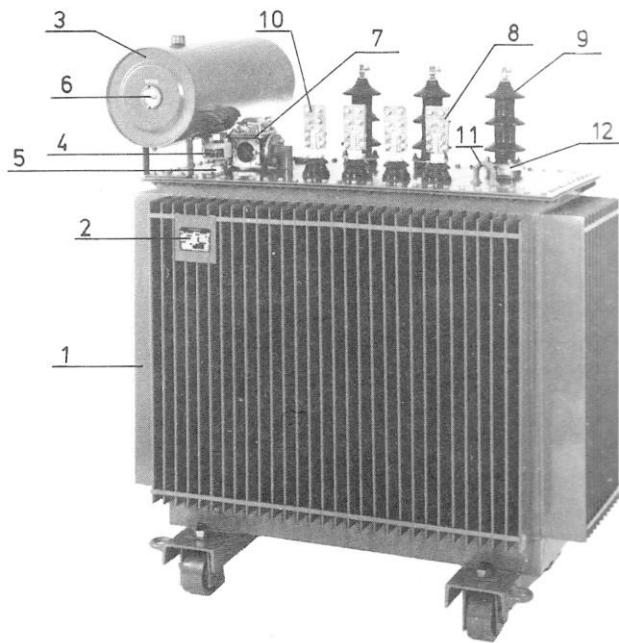
Kuvassa 15 on esitetty erilaisia muuntajasydämiä, joissa viivoitettu alue kuvaa pylväille piirrettyä käämiä. Kuvassa a ja b ovat yksivaihemuuntajan sydämiä, c on kolmivaiheisen sydänmuuntajan sydän, d on kolmivaiheisen 5- pylväsmuuntajan sydän ja e on perinteisen kolmivaiheisen vaippamuuntajan sydän (Elovaara & Haarla 2011b, 143).



**KUVA 15. Erilaisia muuntajan sydänrakenteita (Elovaara & Haarla 2011b, 143)**

Kuvassa 16 on esitetty öljyeristeinen jakelumuuntaja, jossa on väliottokytkin. Kuvan numeroinnit tarkoittavat:

1. Öljysäiliö
2. Arvokilpi
3. Paisuntasäiliö
4. Lämpömittari
5. Lämpömittaritasku
6. Öljykorkeuden osoitin
7. Kaasurele
8. Alajänniteläpivienti
9. Yläjänniteläpivienti
10. Tähtipisteläpivienti
11. Nostosilmukat
12. Väliottokytkimen asennon valitsin.



**KUVA 16. Paisuntasäiliöllinen öljyristeinen jakelumuuntaja (Aura & Tonteri 1986, 82)**

## 5.2 Muuntajan kytkennät

Kolmivaihemuuntajissa käytetään ylä- ja alajännitepuolen kytkentöinä tähtikytkentää (Y, y) tai kolmiokytkentää (D, d). Jakelujännitteillä voidaan käyttää myös hakatähtikytkentää (Z, z). Isoa kirjainta käytetään yläjännitepuolella ja pientä kirjainta alajännitepuolella. Jos muuntajassa on tuotu tähtipiste kannelle, ilmaistaan se merkeillä N ja n. Käämien kytkentätavan määräämä ylä- ja alajännitteiden välinen vaihesiirto ilmaistaan numerolla, joka muodostuu 12 tuntisen kellotaulun numeroista siten, että yksi tunti vastaa 30°:een vaihesiirtoa. Tällä tavalla ilmaistaan, kuinka paljon alajännitepuolen tietyn vaiheen jännite on jäljessä yläjännitepuolen kyseisen vaiheen jännitteestä. Auran & Tonterin mukaan (1986, 50) standardoituja kytkentöjä on neljä, joiden em. luvut ovat 0, 5, 6 ja 11, Suomessa käytössä on yleisimmin 11 ja 0. Esimerkiksi luku 5 tarkoittaa, että alajännite on yläjännitteestä 150° jäljessä. Muuntajan kytkentä ilmoitetaan kirjain- ja numerotunnusyhdistelmällä. Esimerkiksi Dyn11 tarkoittaa sitä, että yläjännitepuolen käämitys on kytketty kolmioon, alajännitepuolen käämitys tähteen ja tähtipiste tuotu muuntajan kannelle, sekä vaihe-erona alajännite 330° jäljessä eli 30° edellä. (Elovaara & Haarla 2011b, 142.)

Tähtikytkentä soveltuu parhaiten suurille jännitteille ja pienille virroille, mutta sitä joudutaan käyttämään myös silloin, kun tarvitaan tähtipiste maadoittamista varten,

jolloin myös käytettävissä on kaksi jännitettä, joiden suhde on  $\sqrt{3}:1$ . Hakatähtikytkentä vastaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan tähtikytkentää ja sitä käytetään pienillä jännitteillä ja pienillä tehoilla. Hakatähtikytkennän etuna on, että muuntajan ensiön ollessa tähtikytketty ja toision hakatähtikytketty, ei jännite-epäsymmetriaa pääse syntymään. Haittoina ovat johdinmateriaalin suurempi tarve ja sisäiset kytkennät ovat monimutkaisemmat kuin tähtikytkennällä. Kolmiokytkennän etuina ovat, että se vaimentaa kolmatta yliaaltoa ja johdon päävirran ja muuntajan käämivirran suhde on  $\sqrt{3}:1$ . Haittana on, että käämijännite on sama kuin johdon pääjännite, joten eristäminen on vaikeampaa. Lisäksi kolmiokytkennästä saadaan vain yksi jännite. (Aura & Tonteri 1986, 72.)

### 5.3 Muuntajan oikosulkuimpedanssi ja oikosulkujännite

Oikosulkuimpedanssin ja oikosulkujännitteen suuruudella voidaan rajoittaa vikavirtojen suuruutta. Pienillä muuntajilla oikosulkuimpedanssin ja oikosulkujännitteen suuruus on standardoitu ja annettu IEC-standardissa 60076-5, mutta suuremmilla muuntajilla ne voidaan valita vapaasti tarpeen mukaan. Oikosulkuimpedanssin ja –jännitteen vähimmäisarvo riippuu muuntajan nimellistehosta, ja suurenee muuntajan koon kasvaessa. Esimerkiksi  $\leq 630$  kVA:n tehoisten muuntajien oikosulkuimpedanssi ja –jännite on vähintään 4 %, 25-40 MVA:n tehoilla vähintään 10 % ja yli 63 MVA:n tehoista lähtien ne voidaan vapaasti valita tarpeen mukaan. (Elovaara & Haarla 2011b, 144.)

Muuntajan oikosulkuimpedanssi mitataan tehtaalla ja merkitään arvokilpeen prosentteina muuntajan nimellisimpedanssista. Se saadaan laskettua myös kaavan 13 mukaan

$$z_k = 100 \frac{Z_k}{Z_n} \%, \quad (13)$$

jossa:

$z_k$  = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

$Z_k$  = muuntajan oikosulkuimpedanssi

$Z_n$  = muuntajan nimellisimpedanssi. (Aura & Tonteri 1986, 43 - 44.)

Kaksikäätymismuuntajan oikosulkuimpedanssi saadaan laskemalla muuntajan oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi yhteen kaavan 14 mukaisesti

$$Z_k = R_k + jX_k \quad (14)$$

jossa:

$R_k$  = muuntajan oikosulkuresistanssi

$jX_k$  = muuntajan oikosulkureaktanssi. (Elovaara & Haarla 2011a, 131.)

Oikosulkujännitteeksi sanotaan jännitettä, jolla syötetyssä oikosuljetussa muuntajassa kulkee muuntajan mitoitusvirran suuruinen virta, joka saadaan laskettua kaavan 15 mukaan

$$U_k = Z_k + I_R \quad (15)$$

jossa:

$U_k$  = oikosulkujännite

$Z_k$  = muuntajan oikosulkuimpedanssi

$I_R$  = mitoitusvirta.

Oikosulkujännite koostuu resistiivisestä osasta, joka on virran kanssa samanvaiheinen ja reaktiivisesta osasta, joka on virtaa 90° edellä. Arvot ilmoitetaan yleensä prosentteina muuntajan mitoitusjännitteestä, jolloin oikosulkujännitteelle saadaan kaavan 16 mukainen yhtälö

$$\underline{U}_k = (u_r + ju_x) \cdot \frac{U_R}{\sqrt{3}} = (R_k + jX_k) \cdot \frac{S_R}{\frac{3 \cdot U_R}{\sqrt{3}}} \quad (16)$$

jossa:

$\underline{U}_k$  = oikosulkujännite

$u_r$  = oikosulkujännitteen resistiivinen osa

$ju_x$  = oikosulkujännitteen reaktiivinen osa

$U_R$  = mitoitusjännite

$R_k$  = muuntajan oikosulkuresistanssi

$jX_k$  = muuntajan oikosulkureaktanssi

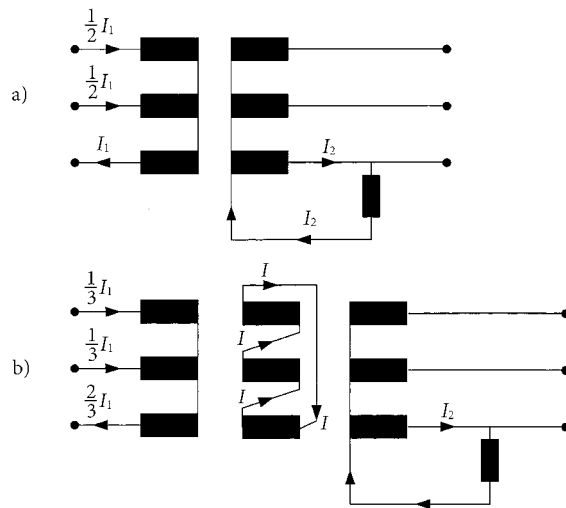
$S_R$  = muuntajan mitoitusteho. (Elovaara & Haarla 2011a, 132.)

Yleensä  $u_r$  on noin 1-2 % ja  $u_x$  on 6-15 %, jolloin reaktiivinen osa kasvaa suhteessa enemmän muuntajan koon kasvaessa.

On olemassa myös niin sanottuja säästökytkettyjä muuntajia. Säästökytketyissä muuntajissa ensiö- ja toisiokäämityksillä on yhteinen osa, jonka vuoksi ne kytkevät galvanisesti yhteen ne verkot, joiden välillä se on. Tällaisen muuntajan oikosulkuimpedanssi on varsin pieni, jolloin sillä ei voida juurikaan rajoittaa vikavirtojen suuruutta. Tämän vuoksi Suomen kantaverkoissa ei käytetä säästömuuntajia. (Elovaara & Haarla 2011a, 133.)

#### **5.4 Tertiäärikäämi**

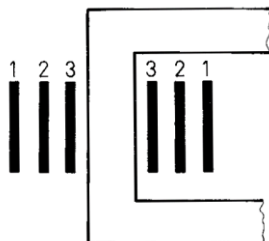
Muuntajalla voi ensiö- ja toisiokäämitysten lisäksi olla myös kolmansioikämitys, eli tertiäärikäämitys, jota myös tasauskäämitykseksi kutsutaan. Usein enintään yhdellä tähtipistemaadoituksella varustetut Yy-kytketyt täys- ja säästökytketyt muuntajat varustetaan kolmioon kytketyllä tasauskäämityksellä. Kolmansioikämitystä käytetään esimerkiksi tasapainottamaan pääjännitteitä kuormituksen ollessa epäsymmetrinen, mutta myös muun toisiojännitteestä poikkeavan kuormituksen syöttämiseen. Tyypillinen tällainen kuorma on rinnakkaisreaktori, jolla kompensoidaan pitkän tyhjäkäyvän voimasiirtojohdon kapasitiivista loistehoa, tai se voi toimia muuntoaseman apusähkön lähteenä. Tertiäärikäämillä voidaan myös vaimentaa tähtipisteen maadoitusjohtimessa kulkevan tyhjäkäyntivirran kolmannen yliaallon suuruutta. Kuvassa 17 on esitetty, kuinka tertiäärikäämi tasoittaa virtajakaumaa Yyn-kytketyssä muuntajassa, kun toisiossa on epäsymmetrinen vaiheen ja maan välille kytketty kuorma. Kuvassa a-muuntajassa ei ole tertiäärikäämiä ja b-muuntajassa on balansoiva tertiäärikäämi. (Elovaara & Haarla 2011b, 157 - 158.)



**KUVA 17. Virtajakauma Yyn-kytketyssä muuntajassa epäsymmetrisellä vaiheen ja maan välisellä kuormalla (Elovaara & Haarla 2011b, 158)**

Jos kolmikäämisen muuntajan jänniteportaat ovat 400 kV, 110 kV ja 21 kV ja alajännitekäämiin kytketään kompensointireaktorit, kehittyvä loisteho virtaa sopivien impedanssisuhteiden vuoksi yläjännitekäämin puolelle, eli 400 kV:n verkkoon. Näin tehdään siksi, että 110 kV:n verkko ei juuri tuota jännitteen nousua aiheuttavaa kapasitiivista loistehoa. Edellä mainitut impedanssisuhteet käämien välillä saadaan aikaan siten, että välijännitekäämi (110 kV) sijaitsee lähinnä pylvästä, alajännitekäämi (21 kV) sijaitsee uloimpana ja yläjännitekäämi (400 kV) sijaitsee näiden käämien välissä. (Elovaara & Haarla 2011a, 134.)

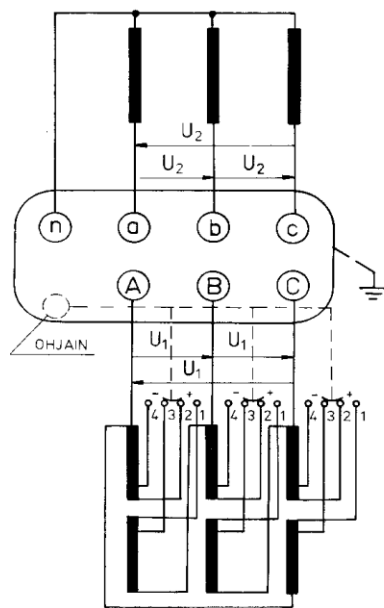
Kuvassa 18 on esitetty kolmikäämimuuntajan yksi pylväs vaihekäämeineen. Kuvassa ensiökäämi on esitetty numerolla 1, joka olisi em. mukaan 21 kV:n käämi, toisiokäämi numerolla 2, joka olisi 400 kV:n käämi ja kolmansiookäämi numerolla 3, joka olisi siis 110 kV:n käämi.



**KUVA 18. Kolmikäämimuuntajan yksi pylväs vaihekäämeineen (Aura & Tonteri 1986, 69)**

## 5.5 Väliottokytkin ja käämikytkin

Sähköverkossa tapahtuvaa jännitevaihtelua voidaan pienentää säätämällä muuntajien jännitettä. Jännitettä säädetään muuntajan muuntosuhdetta muuttamalla. Yleensä säätö tehdään muuttamalla yläjännitekäämityksen kierroslukua, koska virta on yläjännitepuolella pienempi kuin alajännitepuolella. Väliottokytkintä käytettäessä tulee muuntajan olla ehdottomasti jännitteetön, mikä tarkoittaa, että muuntaja on kytketty sähköverkosta irti sekä ylä- että alajännitepuolelta. Jakelumuuntajissa jännitteen säätöön käytetään yleensä väliottokytkintä. Kuvassa 19 on esitetty jakelumuuntajan väliottokytkinkaavio kytkennän ollessa Dyn11. Kytkintä ohjataan ohjaimella muuntajan kannelta, ja kytkintä käytettäessä on erityisen tärkeää, että kytkin on täysin oikeassa asennossa, koska muuten muuntaja vioittuu kun siihen kytketään virta. Väliottokytkimen säätöalue on yleensä  $\pm 5\%$  tai  $\pm 2 \cdot 2,5\%$ . (Aura & Tonteri 1986, 54-56.)

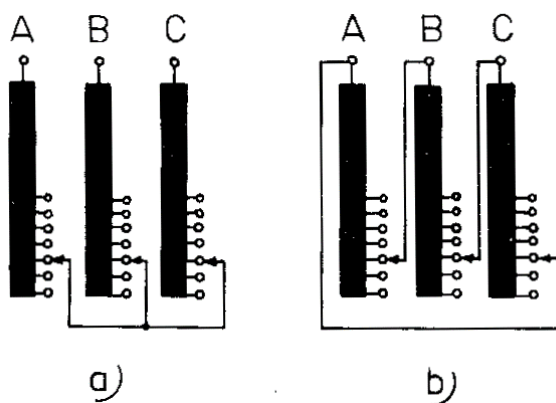


**KUVA 19. Jakelumuuntajan väliottokytkinkaavio, Dyn11 (Aura & Tonteri 1986, 54)**

Suurmuuntajien jännitteensäätö joudutaan tekemään jännitteellisenä ja kuormitettuna. Silloin jännitteen säätöön käytetään käämikytkintä, jolla jännitteen säätö voidaan tehdä muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu. Tähtikytkennässä käytetään kolmivaiheisia nollapistekäämikytkimiä. Nollapistekäämikytkin on siis yksi kolmivaiheinen kytkin. Kolmiokytkennässä eri vaiheiden välillä vaikuttaa pääjännite, jonka vuoksi kolmiokytkennässä käytetään vaihekäämikytkimiä. Vaihekäämikytkimet rakenne-



taan eristysvaikeuksien vuoksi yksivaiheiseksi, jolloin niitä on kolme. Jokaisella vaiheella on siis oma käämikytkin. Käämikytkimessä on yleensä monta säätöporrasta, ja yksi porras on noin 1,5 %. Yleisimpiä säätöalueita ovat  $\pm 6 * 1,67 \% = \pm 10 \%$ ,  $\pm 9 * 1,67 \% = \pm 15 \%$ ,  $\pm 9 * 1,33 \% = \pm 12 \%$ . Kuvassa 20 on esitetty periaatteellinen kytkentä nollapistekäämikytkimelle a, ja vaihekäämikytkimelle b. (Aura & Tonteri 1986, 57.)



**KUVA 20. Nollapistekäämikytkin a, vaihekäämikytkin b (Aura & Tonteri 1986, 57)**

## 6 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Versowood Otavan tehdas on keskijänniteasiakas, ja tehdasalueella sijaitsee viisi jakelumuuntajaa. Säännöllisten investointien ja koneiden kehityksen myötä muuntajatehot jäävät pikkuhiljaa pieneksi ja samalla oikosulkumoottoreiden lisäys verkossa aiheuttaa loistehokompensoinnin jäämisen riittämättömäksi. Lisäksi laitosten automatisoinnin kehittyminen on johtanut siihen, että moottoreita ohjataan taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajien kehittyminen ja hintojen aleneminen on taas johtanut siihen, että pikkuhiljaa lähes jokaisella moottorilla on oma taajuusmuuttajansa. Tämän lisäksi tietokoneiden määrä tuotantolinjoissa on moninkertaistunut viime vuosien aikana. Taajuusmuuttajat ja tietokoneet aiheuttavat verkkoon yliaaltoja, jotka häiritsevät ja vioittavat tietotekniikkalaitteita.

Tutkimuksessa mitattiin muuntajien kuormituksen nykytilaa sekä loistehon kompensoinnin riittävyyttä eri muuntajien pääkeskuksissa. Lisäksi mitattiin kolmannet, vii-

dennet ja yhdeksännet jännite- ja virtayliaallot sekä jännitteen ja virran kokonaissäröt. Muuntajien kuormituksen mittauksen tavoitteena oli selvittää, voiko muuntajien perään lisätä vielä kuormaa. Tutkimuksen pääpaino oli selvittää loistehon kompensoinnin riittävyys eri muuntajien pääkeskuksissa. Samalla käytiin läpi loistehoparistojen kunto lähinnä mittaamalla niiden ottama virta. Koska tutkimukseen käytetyssä mittarissa oli mahdollisuus mitata myös jännite- ja virtayliaallot sekä jännitteen ja virran kokonaissäröt, mitattiin ne samalla kertaa, vaikka harmonisia yliaaltoja ei olekaan käsitelty tuloksissa.

Alun perin tutkimuksessa oli tarkoitus keskittyä vain tehtaan alkupään muuntajiin 1 ja 2, mutta mittauksia suoritettaessa mukaan otettiin myös muuntajat 3 ja 4. Kondensaattoriparistojen kunto mitattiin kuitenkin vain muuntajien 1 ja 2 osalta. Muuntaja numero 5 jätettiin pois mittauksista, koska mittausten aikana kaikki muuntajan perään kytketyt laitokset eivät olleet toiminnassa, sekä muuntajan jälkeiseen pääkeskukseen asennetusta automaattisesti säätyvästä estokelaparistosta oli vioittunut neljä paristoa kytkeviä kontaktoreita sekä kolme kondensaattoriparistoa.

## **7 MITTAUSKOhteet JA MITTAUKSET**

Mittauspaikkoina käytettiin muuntajien syöttämiä pääkeskuksia. Mittalaitteen virranmittaussilmukat asennettiin muuntajalta tulevien nousukaapelien ympärille, ja jännitteen mittauksen mittapihdit asennettiin yhteen keskuksen kiskostolta lähtevään sulakelähtöön. Mittalaitteena oli Metrelin Power Quality Analyzer Plus -mittalaite. Mittari rekisteröi mittaustulokset 15 minuutin jaksoissa, ja jaksoja on pyritty ottamaan vähintään kymmenen.

### **7.1 Pääkeskus PK 1**

Pääkeskus PK 1 saa syöttönsä muuntajalta T1, joka on 1000 kVA:n muuntaja. T1 syöttää pääkeskus PK 1:stä nousukaapeilla 3 AMMK 3\*1\*300. Muuntaja T1 on Strömbergin valmistama muuntaja KTMU 24X4627 vuosimallia 1971, jonka kytkentä on Dyn11. Pääkeskus 1:een on kytketty automaattisesti säätyvä kondensaattoriyksikkö, joka sisältää 4 kappaletta 50 kVarin paristoa. Tästä kondensaattoriyksiköstä oli palanut kaksi etusulaketta, jotka vaihdettiin ennen mittausta. Yhteensä siis 200 kVaria

kompensointitehoa. Mittaus suoritettiin 15.6.2011 kello 06:14 - 11:14, mittausotantoja 21 kappaletta. Kuvassa 21 on esitetty virranmittaussilmukat PK 1:lle tulevien nousukaapeleiden ympärillä.



**KUVA 21. Virranmittaus muuntajalta T1 tulevista nousukaapeleista**

## **7.2 Pääkeskus PK 2**

Pääkeskus PK 2 saa syöttönsä pääkeskus PK 2.1:ltä 4 AXMK 3\*1\*300 kaapeleilla. Pääkeskus 2:een on asennettu viisi kondensaattoriparistoa, joista neljä on automaattisen säätäjän perässä. Kiinteä paristo on 50 kVarin yksikkö, ja säätäjän perässä on kaksi 25 kVarin ja kaksi 50 kVarin paristoa. Lisäksi pääkeskuksen PK 2 syöttämän alakeskuksen jälkeen on yksi laitekohtainen kondensaattoriparisto, joka on 21 kVarin kokoinen. Yhteensä siis 221 kVaria kompensointitehoa. Mittaus suoritettiin 16.6.2011. Kuvassa 22 näkyy PK 2:n kompensointiparistot.



**KUVA 22. PK 2:n kondensaattoriparistot**

### **7.3 Pääkeskus PK 2.1**

Pääkeskus PK 2.1 saa syöttönsä muuntajalta T2, joka on 2000 kVA:n muuntaja. Pääkeskuksen PK 2.1 nousukaapeleina on 4 AXMK 3\*1\*800. Muuntaja T2 on Strömbergin valmistama KTMU 24NA2000, vuosimallia 1994. KytKentä on Dyn11. Pääkeskus 2.1:een on kytketty kiinteä kondensaattoriyksikkö, joka koostuu kahdesta paristosta. Näiden paristojen yhteisteho on 150 kVaria. Pariston kuntoa tarkistettaessa todettiin, että yksikkö ottaa vain noin 105 ampeeria virtaa vaihetta kohti, vaikka nimellinen vaihevirta on 217 ampeeria. Tästä voidaan päätellä, että toinen paristo on mahdollisesti vioittunut, joten todellinen loistehotuotto olisi vain noin 75 kVaria.

Lisäksi kahteen pääkeskuksen syöttämien moottoreiden käynnistimien napoihin on kytketty kaksi 50 kVarin patteristoa. Yhteensä kompensointitehoa olisi siis 250 kVaria, jos kaikki paristot olisivat kunnossa. Nyt tehoa on siis todennäköisesti vain 175 kVaria. Pääkeskuksen mittaus suoritettiin 14.6.2011 ja kuvassa 23 näkyy jännitteen ja nollajohtimen mittauspihdit kiinnitettyinä pääkeskus PK 2.1:een.



**KUVA 23. Jännitteen ja nollajohtimen mittauspihdit kiinnitettynä PK 2.1:een**

#### **7.4 Pääkeskus PK 3**

Pääkeskus PK 3 saa syöttönsä muuntajalta T3 nousukaapeleita 3 AMMK 3\*1\*300 pitkin. T3 on Strömbergin valmistama KTMU 24X4627 muuntaja, jonka vuosimalli on 1971. KytKentä on Dyn11. Pääkeskukseen PK3 ei ole asennettu kondensaattoriparistoja, mutta kahdeksaan keskuksen perässä olevan moottorin turvakytkimen yhteyteen on asennettu kiinteä 10 kVarin kokoinen kondensaattoriparisto. Lisäksi keskuksen PK 3 syöttämässä jakokeskuksessa JK2 on 100 kVarin kokoinen kiinteä kondensaattoriyksikkö ja kuivaamon jakokeskuksessa on kahdeksan kappaletta 15 kVarin kokoisia kiinteitä kondensaattoreita. Yhteensä loistehokompensointia olisi siis 300 kVaria.

Mittaussuoritusten aikana oli käynnissä investointi, jonka sähkönsyöttö tultiin otta-  
maan muuntajalta T3. Investoinnin edetessä kävi ilmi, että muuntajan teho ei tulisi  
riittämään. Tämän seurauksena muuntaja T3 vaihdettiin suurempaan 1600 kVA:n  
muuntajaan. Lisäksi uuden muuntajan syöttämään uuteen lisäkeskukseen tulee auto-  
maattisesti säätyvä kompensointiyksikkö. Tässä tutkimuksessa mittaukset on kuiten-  
kin tehty vanhan muuntajan ollessa käytössä. Kuvassa 24 on käynnissä mittaus muun-  
tajalta T3 tulevista nousukaapeleista. Mittaus suoritettiin 20.6.2011.



**KUVA 24. Mittaus PK 3:n nousukaapeleista**

## **7.5 Pääkeskus PK 4**

Pääkeskus PK 4 saa syöttönsä muuntajalta T4 nousukaapeleita 3 AMMK 3\*1\*300 pitkin. Muuntaja T4 on Strömbergin valmistama KTMU 24XA4806, vuosimallia 1984. Muuntajan teho on 800 kVA, ja kytkentä on Dyn11. Pääkeskus PK 4:ssä on kiinteästi keskukseen asennettuja kondensaattoriparistoja sekä keskuksen syöttämiin alakeskuksiin asennettuja laite- ja laiteryhmäkohtaisia kondensaattoriparistoja, jotka ovat asennettu moottorien käynnistimien napoihin. Yhteensä kondensaattoriparistoja on 22 kpl yksiköiden koon ollessa 5-100 kVaria. Kaikkiaan loistehokompensointitehoa on 385 kVaria. Mittaus suoritettiin 22.6.2011.

## **8 TULOKSET**

Tuloksissa on ensin esitetty keskusten ottamat maksimikuormitusvirrat ja keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet. Keskimääräiset tehokertoimet on laskettu jakamalla keskimääräinen teho keskimääräisen jännitteen ja keskimääräisen virran tulolla. Lisäksi on esitetty keskuskohtaisesti pätö- ja loistehon määrät. Versowood Otavan Saha sijaitsee Suur-Savon Sähkön verkon alueella ja sähkön siirrosta vastaa Järvi-Suomen Energia. Loistehon ilmaisosuus Järvi-Suomen Energian verkkosivuilla olevan esitteen mukaan keskijänniteasiakkaalle on 0,2 kVaria jokaista pätötehon 1 kW:a kohti (Järvi-Suomen Energia 2011, verkkodokumentti, 2). Tämän ylittävältä osuudelta peritään loistehomaksua 4,45 €/kVar/kk.

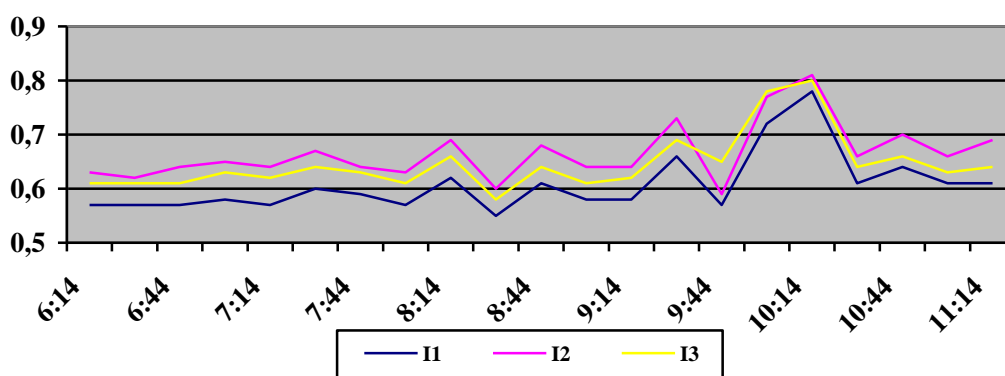
## 8.1 Muuntaja T1 ja pääkeskus PK 1

Muuntaja T1 on 1000 kVA:n muuntaja, jolloin sen vaihekohtainen nimelliskuormitusvirta on kaavan 2 mukaan

$$I = S / (U \cdot \sqrt{3}) = 1000\,000 \text{ VA} / (400 \cdot \sqrt{3}) = 1443 \text{ A}$$

Mittauksissa suurin vaihekohtainen kuormitusvirta mitattiin vaiheelta 2, ja se oli 810 ampeeria. Keskimäärin vaihekohtaiset maksimivirrat vaihtelivat 600 - 700 ampeerin välillä. Muuntajan kuormituksesta on siis käytössä alle 60 prosenttia. Koska mittaus on suoritettu kesä-aikaan, eikä kaikkein suurin tukki ollut sahauksessa, saattaa maksimikuormitusvirrat olla talvella suurimmalla tukilla huomattavastikin suuremmat. Kaaviossa 1 on esitetty muuntajan T1 vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat mittausjakson eri aikoina.

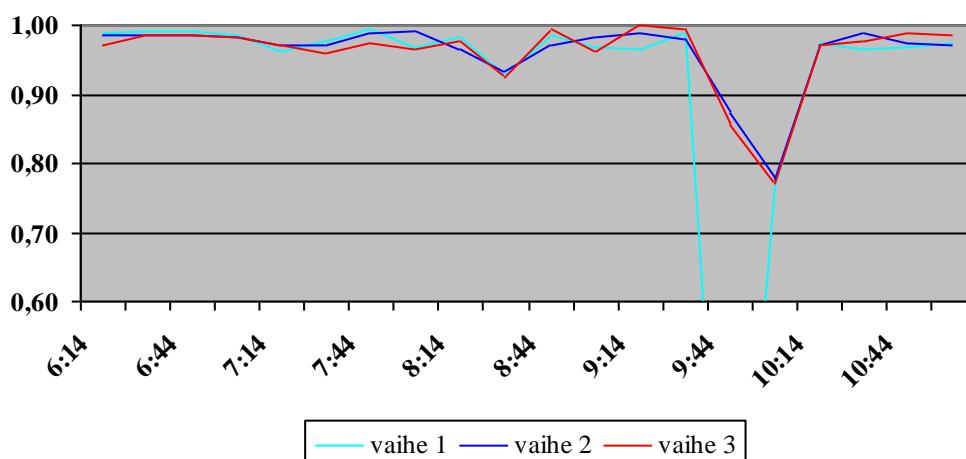
**T1 Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat kA**



**KAAVIO 1. Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat muuntajalla T1**

Pääkeskus PK 1:n keskimääräiset tehokertoimet olivat suurimmaksi osaksi aikaa 0,96-0,99. Pääkeskus 1:ssä on automaattisesti säätyvä kondensaattoripatteristo, mutta säädin ei aina ehdi reagoida muutoksiin, ja tehokerroin käy myös usein kapasitiivisella puolella. Kaaviossa 2 on esitetty vaihekohtaiset tehokertoimet pääkeskuksesta 1 mitattuna.

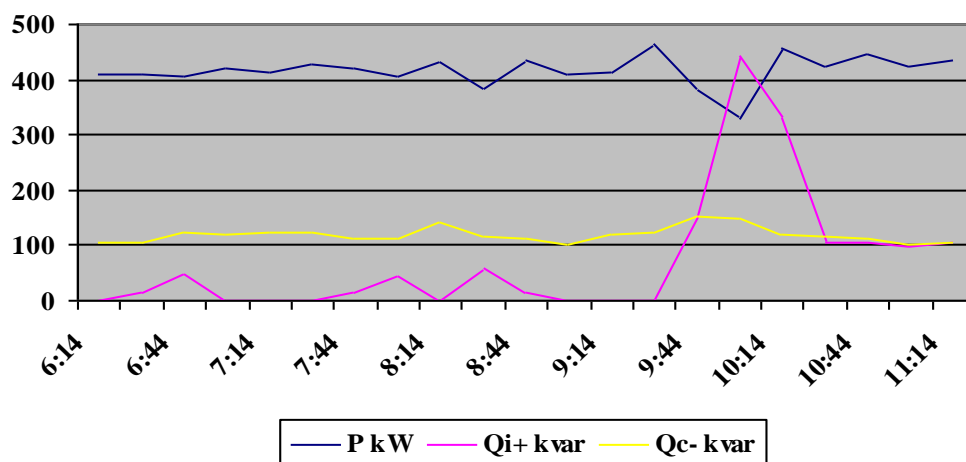
### Keskimääräiset tehokertoimet



**KAAVIO 2. Keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet PK 1:ssä**

Kaaviossa 3 näkyy pätö- ja loistehohuiput. Kuten kaaviosta 3 käy ilmi, on loistehon kompensointi mittauksen aikana lähes jatkuvasti kapasitiivisella puolella, eli tapahtuu ylikompensointia. Koska PK 1:ssä on automaattisesti säätävä kondensaattoripatteristo, voidaan mittausten perusteella päätyä siihen tulokseen, että säädin ei toimi kunnolla. Säädin ylikompensoi lähes jatkuvasti, ainakin näillä kuormituksilla. Mitattu pätöteho-huippu oli 464 kW ja loistehohuiput 443 kVaria induktiivista ja 152 kVaria kapasitiivista.

### Pätö- ja loistehohuiput

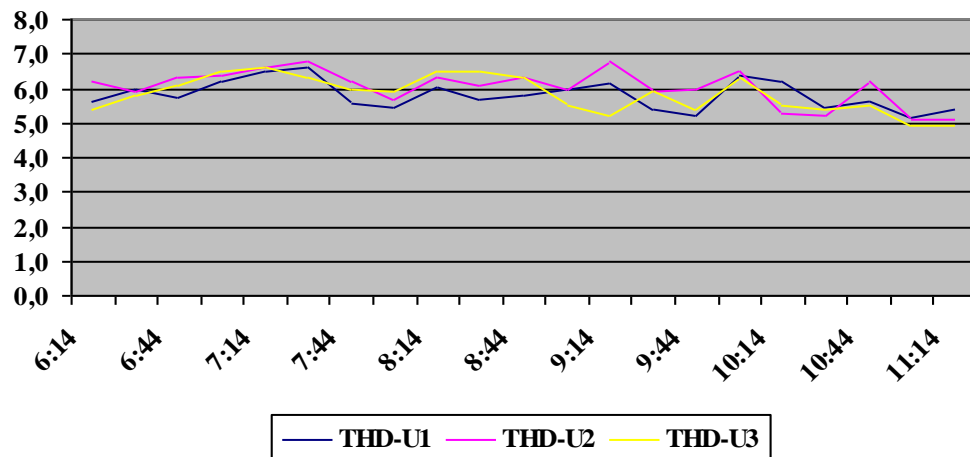


**KAAVIO 3. Pätö- ja loistehohuiput PK 1:ssä**



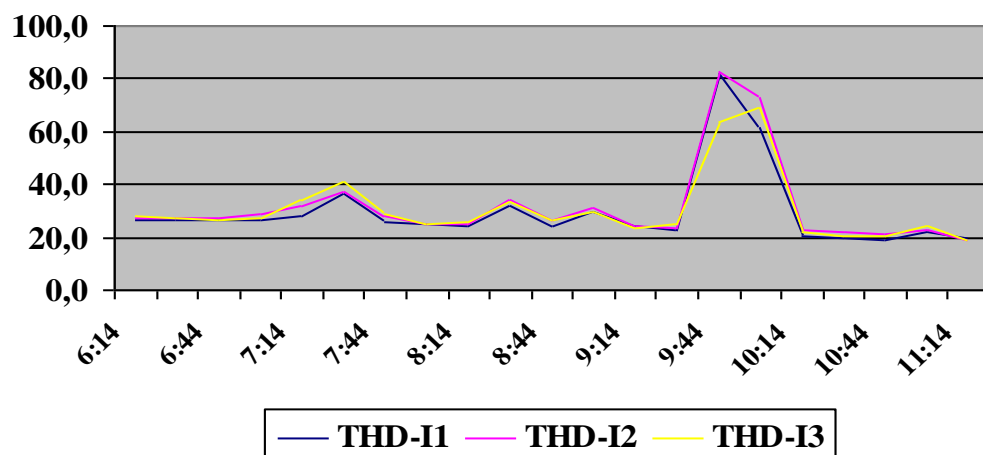
Tuloksissa näkyvä käyrien hyppäys mittausjaksojen 09:59-10:14 aikana johtuu ruokailutauosta, jolloin suurin osa laitteista pysäytetään ja käynnistetään taas tauon loputtua. Kaaviossa 4 on esitetty jännitteen kokonaissärö, THD-U, jokaiselle vaiheelle. Jännitteen kokonaissärö on selvästi yli suositellun 3 prosenttia, mutta jää vielä alle suurimman sallitun 8 prosenttia. Kaaviossa 5 on esitetty vaihekohtaisesti virran kokonaissärö THD-I, joka on selvästi yli sallitun 8 prosentin, jopa välillä yli kymmenkertainen.

**THD-U max**



**KAAVIO 4. Jännitteen kokonaissäröt THD-U PK 1:ssä**

**THD-I max**



**KAAVIO 5. Virran kokonaissäröt THD-I PK 1:ssä**

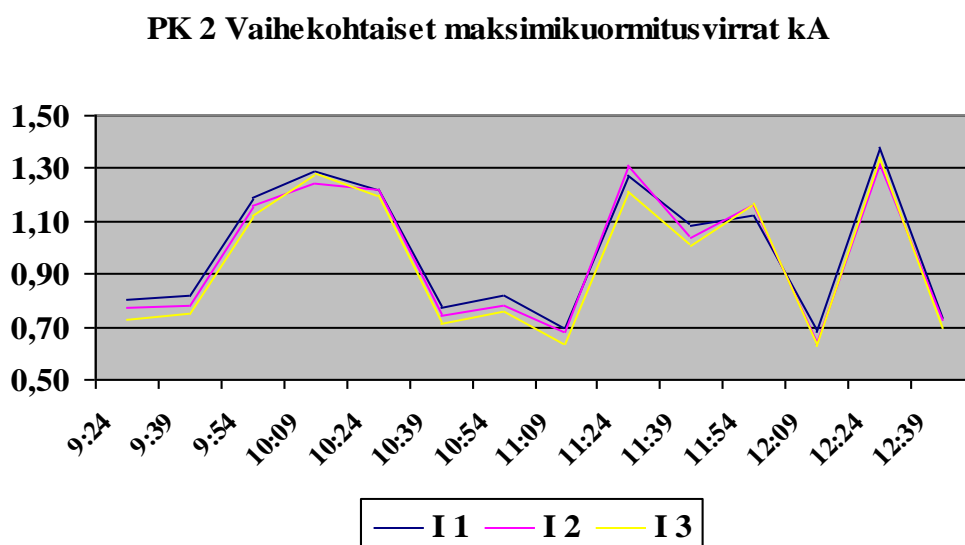
## 8.2 Muuntaja T2 ja pääkeskukset PK 2 ja PK 2,1

Kuten aiemmin oli mainittu, pääkeskus PK 2 saa syöttönsä pääkeskus PK 2,1:ltä, jota taas syöttää muuntaja T2. Muuntaja T2 on 2000 kVA:n muuntaja, jolloin sen vaihekohtainen nimelliskuormitusvirta on kaavan 2 mukaan

$$I = S / (U \cdot \sqrt{3}) = 2000\,000\text{ VA} / (400 \cdot \sqrt{3}) = 2887\text{ A}.$$

### 8.2.1 Pääkeskus PK 2

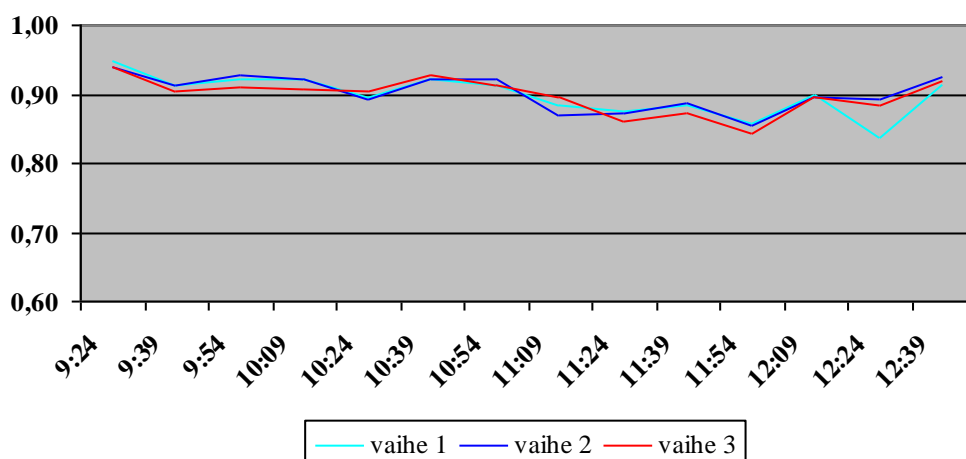
Mittauksissa suurin vaihekohtainen kuormitusvirta oli 1380 ampeeria, ja se mitattiin vaiheelta 1. Vaihekohtaisesti kuormitukset olivat keskenään tasaisia, vaikka kuormitukset muuten vaihtelivat suuresti. Kaaviossa 6 on esitetty PK 2:n maksimikuormitusvirrat vaihekohtaisesti mittausjakson eri aikoina.



**KAAVIO 6. Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat pääkeskus PK 2:lla**

Pääkeskus PK 2:n keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet olivat 0,90 molemmin puolin, joten korjaamisen varaa kompensoinnista löytyy. Pääkeskus PK 2:ssa on automaattisesti säätyvää kompensointitehoa 150 kVaria ja kaksi kiinteää patteristoa, teholtaan yhteensä 71 kVaria. Kaaviossa 7 on esitetty pääkeskus PK 2:n vaihekohtaiset keskimääräiset tehokertoimet.

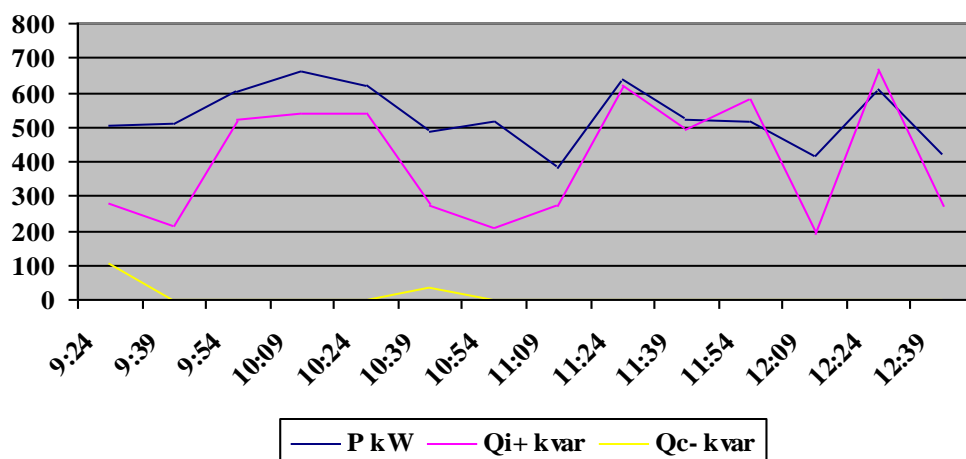
### Keskimääräiset tehokertoimet



**KAAVIO 7. Keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet PK 2:ssa**

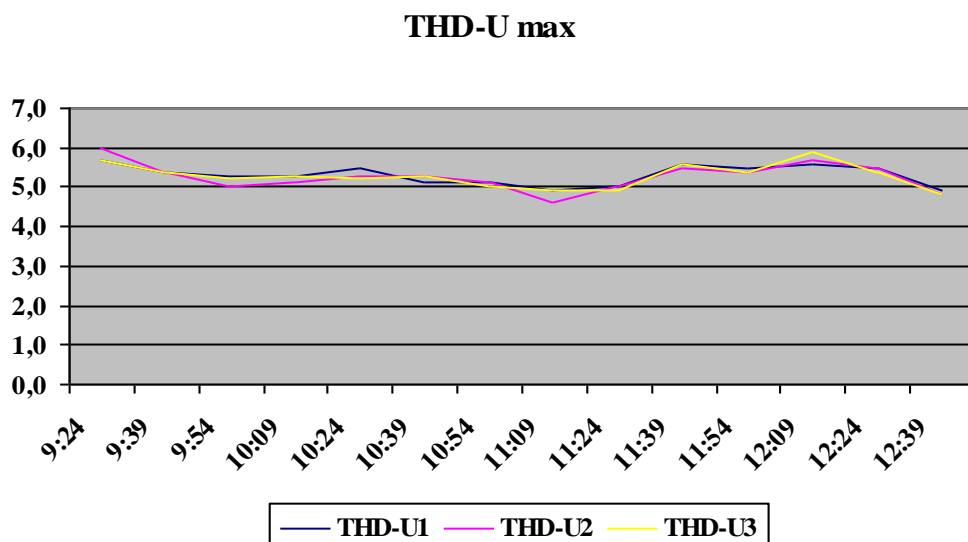
Kaaviossa 8 on esitetty PK 2:n pätö- ja loistehohuiput. Tuloksista käy ilmi, kuinka loistehon kompensointi on riittämätön, jolloin loistehoa otetaan verkosta paljon. Mitattu pätötehohuippu oli 662 kW ja loistehohuippu 669 kVaria induktiivista.

### Pätö- ja loistehohuiput

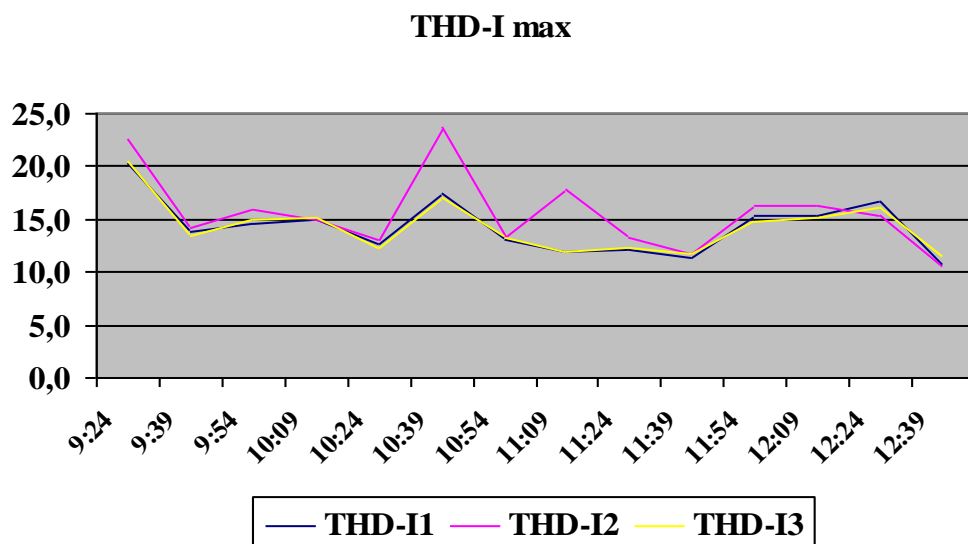


**KAAVIO 8. Pätö- ja loistehohuiput PK 2:ssa**

Kaavioissa 9 ja 10 on esitetty pääkeskus 2:n vaihekohtaiset jännite- ja virtasäröt. Jännitesäröt ylittävät suositellun kolme prosenttia, mutta pysyvät selkeästi alle sallitun kahdeksan prosentin. Virtasäro ylittää selvästi sallitun kahdeksan prosenttia.



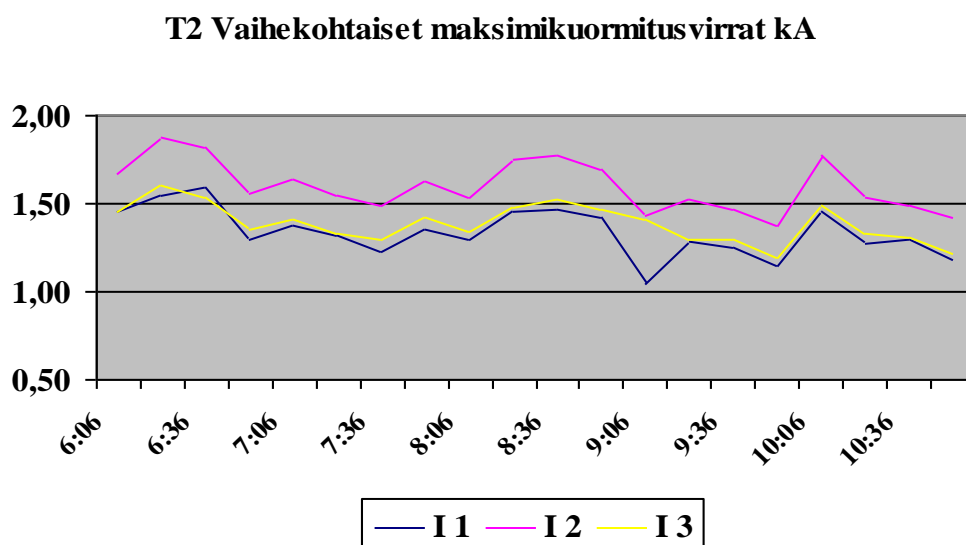
**KAAVIO 9. Jännitteen kokonaissäröt THD-U PK 2:ssa**



**KAAVIO 10. Virran kokonaissäröt THD-I PK 2:ssa**

### 8.2.2 Pääkeskus 2.1

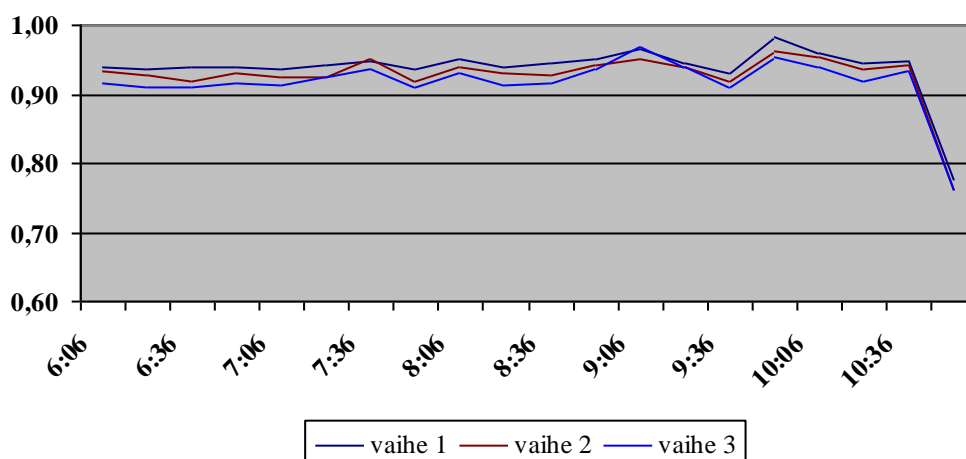
Pääkeskus 2.1 saa siis syöttönsä muuntajalta T2, jonka maksimi vaihekohtainen nimelliskuormitusvirta on 2887 ampeeria. Mittauksissa suurin vaihekohtainen kuormitusvirta mitattiin vaiheelta kaksi, ja se oli 1870 ampeeria, kuormituksesta on siis käytössä alle 65 prosenttia. Kaaviossa 11 on esitetty mittaustulokset pääkeskus 2.1:n maksimivirroista, jotka ovat siis samalla muuntaja T2:n maksimikuormitusvirtoja. Kaaviosta tulee esiin kuinka epäsymmetrinen kuormitus on eri vaiheilla. Vaihe kaksi on selvästi enemmän kuormitettu kuin muut vaiheet.



**KAAVIO 11. Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat muuntajalla T2**

Kaaviossa 12 on esitetty keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet pääkeskus PK 2.1:ssä. PK 2.1:ssä ei ole automaattisesti säätyvää kompensointiyksikköä, vaan kaksi kiinteää kondensaattoriparistoa, joiden yhteisteho on 150 kvaria. Kuten aiemmin on mainittu, toinen näistä paristoista lienee viallinen, joten kompensointitehoa näillä paristoilla olisi vain 75 kvaria. Lisäksi on kaksi 50 kvarin patteristoa, jotka ovat kytketty moottorien käynnistimiin. Tehokerroin oli paras vaiheella 1, jonka arvot olivat keskimäärin noin 0,94 - 0,96, toiseksi parhaat arvot olivat vaiheella 2, jonka arvot olivat keskimäärin noin 0,92 - 0,94, ja huonoimmat arvot olivat vaiheella 3, keskimääräisillä arvoilla noin 0,91 - 0,94. Edellä mainitut arvot ovat vain karkeita keskiarvoja kaikista mittauksen arvoista.

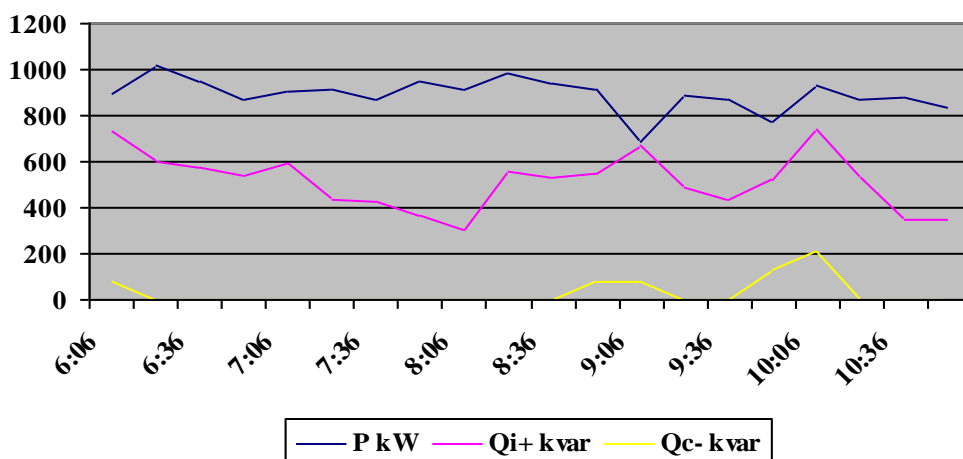
### Keskimääräiset tehokertoimet



**KAAVIO 12. Keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet PK 2.1:ssä**

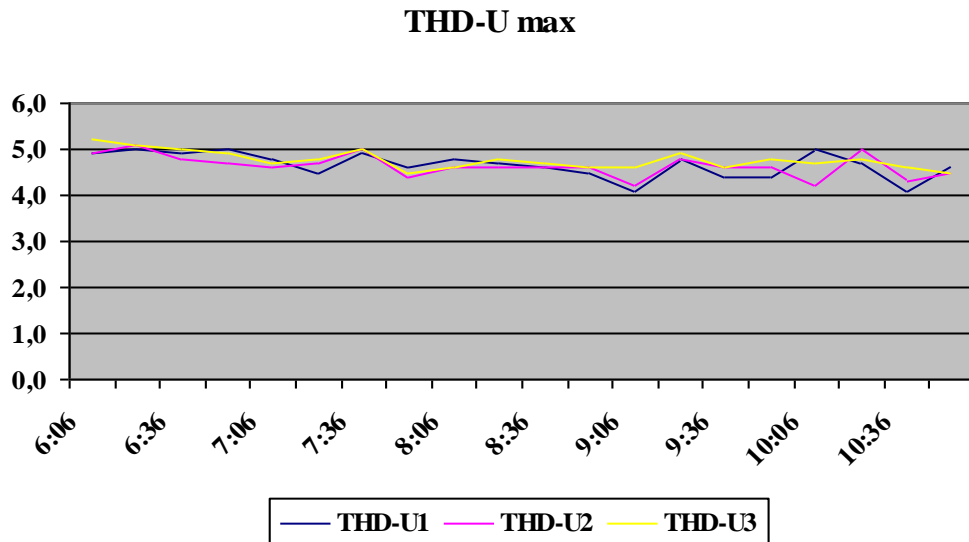
Kaaviossa 13 on esitetty pätö- ja loistehohuiput. Mitattu pätötehuippu oli 1014 kW ja loistehohuippu 738 kVaria. Kompensointi käy välillä hieman myös kapasitiivisella puolella, tämä tapahtuu lähinnä vähiten kuormitetulla vaiheella yksi.

### Pätö- ja loistehohuiput

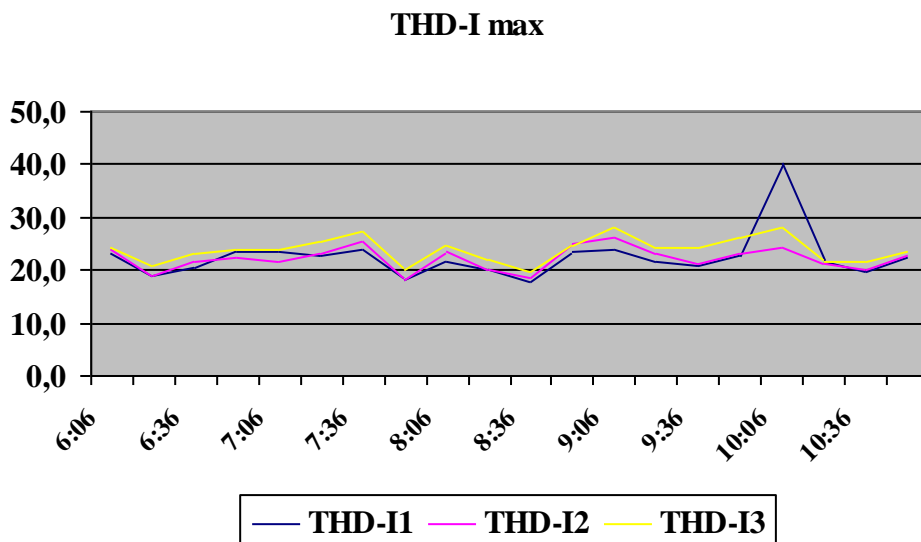


**KAAVIO 13. Pätö- ja loistehohuiput PK 2.1:ssä**

Kaavioissa 14 ja 15 on esitetty jännite- ja virtasäröt pääkeskuksessa PK 2.1. Kaaviossa 14 näkyvä jännitesärö ylittää suositellun 3 prosentin rajan, mutta jää selvästi alle sallitun 8 prosentin. Kaaviossa 15 esitetty virtasärö ylittää raja-arvot selvästi.



**KAAVIO 14. Jännitteen kokonaissärö THD-U PK 2.1:ssä**



**KAAVIO 15. Virran kokonaissärö PK 2.1:ssä**

### 8.3 Muuntaja T3 ja pääkeskus PK 3

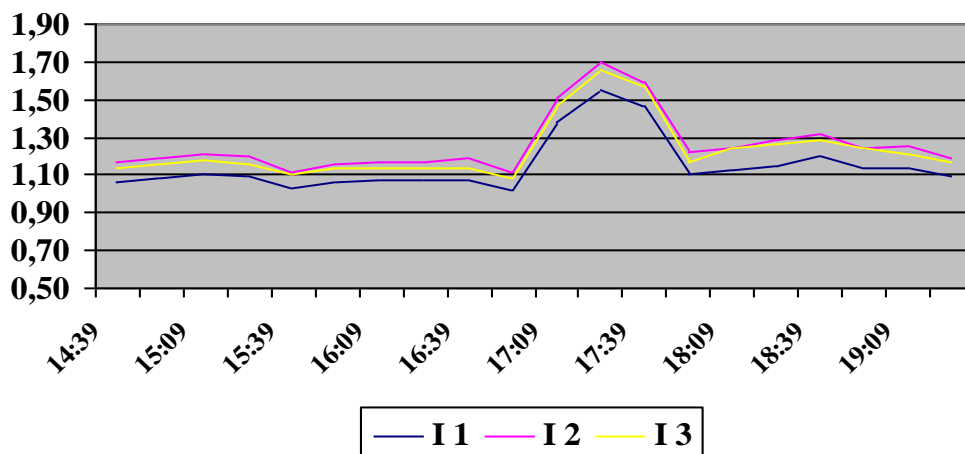
Muuntaja T3 on 1000kVA:n muuntaja, jonka vaihekohtainen nimelliskuormitusvirta on kaavan 2 mukaan

$$I = S / (U \cdot \sqrt{3}) = 1000\,000 \text{ VA} / (400 \cdot \sqrt{3}) = 1443 \text{ A}$$

Kuormitusvirrat olivat 1200–1300 ampeerin välillä suurimman osan ajasta, mutta välillä virrat nousivat jopa 1700 ampeeriin, eli muuntajaa ylikuormitetaan. Suurin virta

mitattiin vaiheelta kaksi. Kaaviossa 16 on esitetty muuntajan T3 vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat. Tämän insinööriyön aikana käynnistettiin investointi, jonka sähkön syöttö tultaisiin ottamaan muuntajasta T3. Koska muuntajassa ei ollut enää varoja nostaa kuormitusta, korvattiin muuntaja 1600 kVA:n muuntajalla.

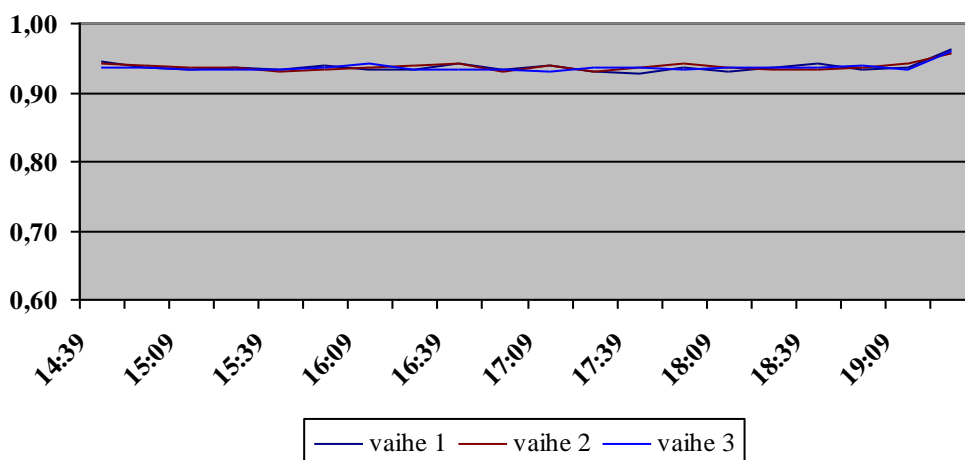
**T3 Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat kA**



**KAAVIO 16. Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat muuntajalla T3**

Kaaviossa 17 on esitetty pääkeskus PK 3:n vaihekohtaiset tehokertoimet. Kuten kaaviosta näkyy, tehokertoimet ovat eri vaiheilla hyvin samanlaiset ja tasaiset. Tehokertoimet ovat lähes jatkuvasti välillä 0,93 - 0,94. Tässä keskuksessa olisi lisäkompensoinnin aihetta.

**Keskimääräiset tehokertoimet**

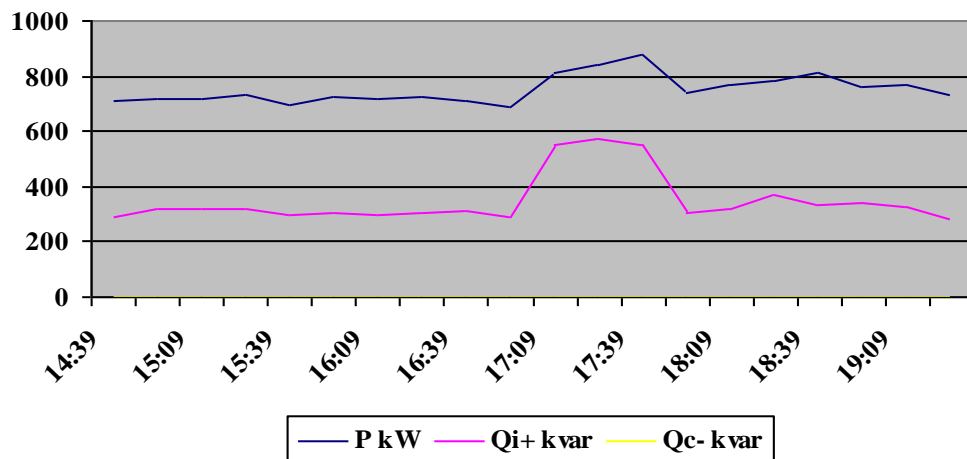


**KAAVIO 17. Keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet PK 3:ssa**



Kaaviossa 18 on esitetty pätö- ja loistehohuiput pääkeskus PK 3:ssa, jotka ovat samalla muuntaja T3:n pätö- ja loistehuippuja. Tämän muuntajan perässä ei ole automaattisesti säätyviä kompensointiyksiköjä, vaan kiinteitä kondensaattoriparistoja. Yhdessä jakokeskuksessa on keskuksen kiskostoon kytketty 100 kvarin patteristo ja lisäksi on 200 kvarin verran kompensointitehoa kytkettyinä moottorien käynnistimiin ja turvakytkimiin. Suurin mitattu pätöteho huippu oli 876 kW:a ja loistehohuippu 570 kVaria induktiivista. Loistehon kompensointi ei käynyt kertaakaan kapasitiivisella puolella.

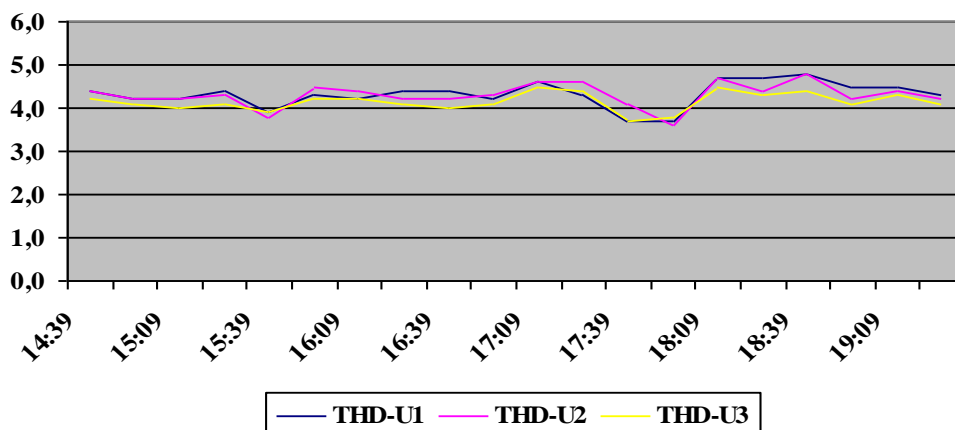
### Pätö- ja loistehohuiput



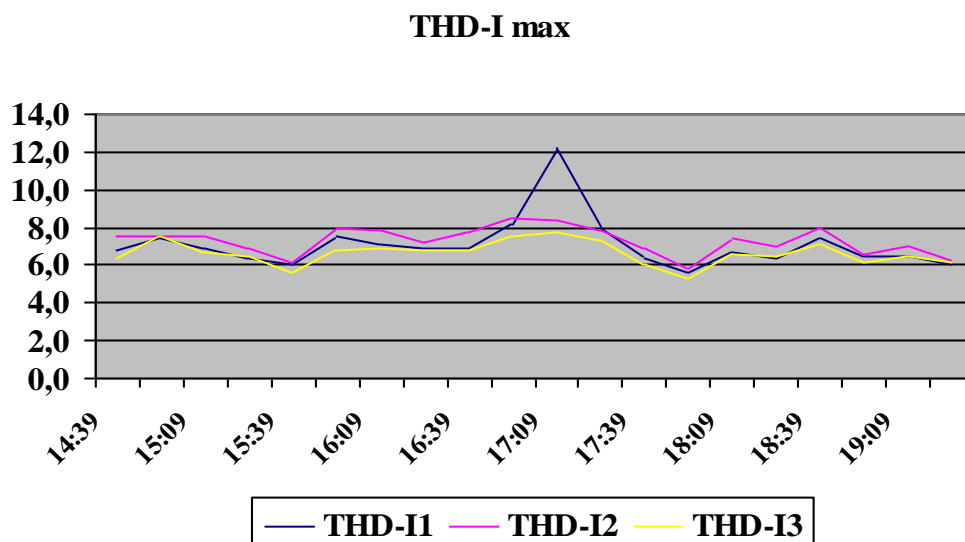
**KAAVIO 18. Pätö- ja loistehohuiput PK 3:ssa**

Kaavioissa 19 ja 20 on esitetty pääkeskus PK 3:n jännite- ja virtasäröt. Jännitesärö ylittää suositellun 3 prosenttia, mutta pysyy alle sallitun 8 prosentin. Vitasäröt pysyvät myös lähes koko ajan alle 8 prosenttia, muutamaa ylitystä vaiheella 1 ja 2 lukuunottamatta.

### THD-U max



**KAAVIO 19. Jännitteen kokonaissärö THD-U PK 3:ssa**



**KAAVIO 20. Virran kokonaissärö THD-I PK 3:ssa**

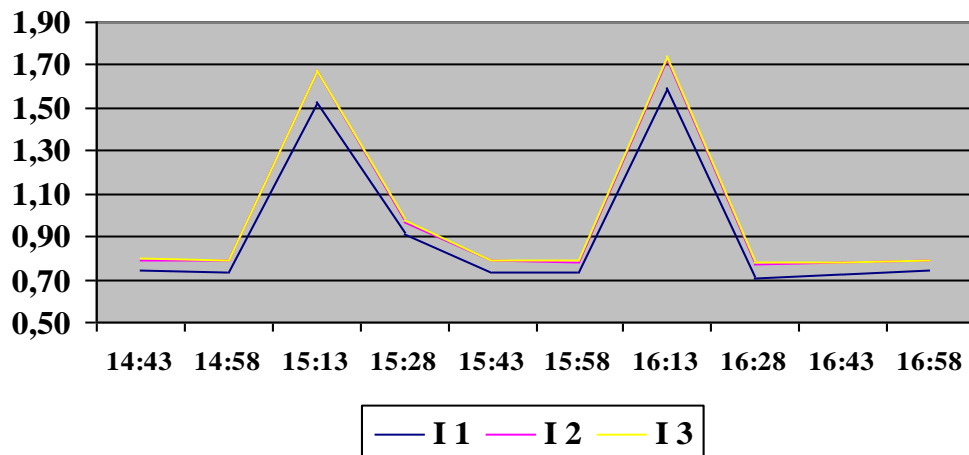
#### **8.4 Muuntaja T4 ja pääkeskus PK 4**

Muuntaja T4 on 800 kVA:n muuntaja, jonka vaihekohtainen maksimi nimelliskuormitusvirta on kaavan 2 mukaan

$$I = S / (U \cdot \sqrt{3}) = 800\,000 \text{ VA} / (400 \cdot \sqrt{3}) = 1154 \text{ A}$$

Mittauksissa suurin vaihekohtainen kuormitusvirta mitattiin vaiheelta 3, ja arvo oli 1740 ampeeria. Muuntajan nimelliskuormitusvirta ylitettiin siten yli 50 prosentilla, tosin kuormitus oli hetkellistä. Kuormitushuiput tulevat todennäköisesti suurten puhallinmoottoreiden käynnistymisestä, joten kuormitushuiput ovat hyvin lyhytaikaisia.

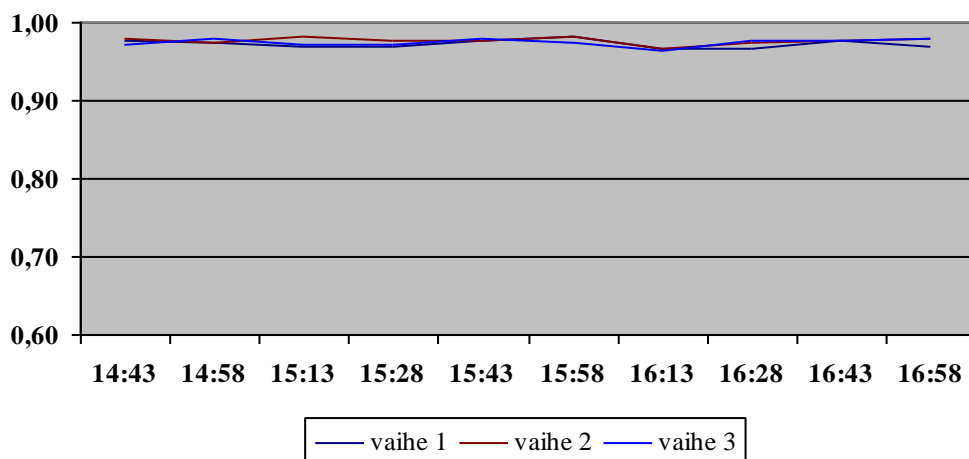
### T4 Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat kA



**KAAVIO 21. Vaihekohtaiset maksimikuormitusvirrat muuntajalla T4**

Pääkeskus PK 4:n keskimääräiset tehokertoimet olivat lähes koko ajan 0,98. PK 4:ssä ei ole automaattisesti säätyviä kompensointiyksiköitä, vaan kiinteitä keskuksen kiskostoon liitettyjä ja moottoreiden käynnistimiin liitettyjä kondensaattoriparistoja. Tämä ratkaisu tuntuu mittausten perusteella toimivan hyvin. Kaaviossa 22 on esitetty PK 4:n keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet.

### Keskimääräiset tehokertoimet

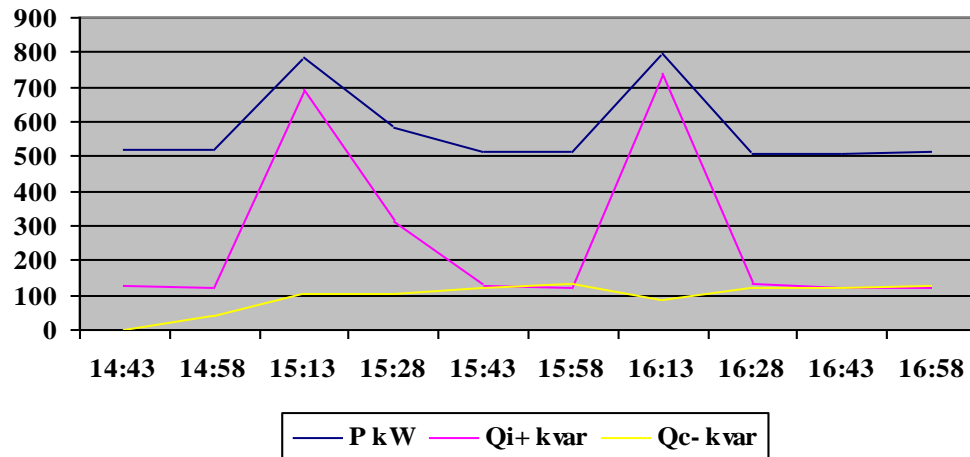


**KAAVIO 22. Keskimääräiset vaihekohtaiset tehokertoimet PK 4:ssä**

Kaaviossa 23 on esitetty pääkeskus PK 4:n pätö- ja loistehohuiput mittausotantojen aikana. Suurin mitattu pätötehohuippu oli 799 kW ja loistehohuippu 739 kVaria. Loistehon kompensointi toimii muuten hyvin, mutta suurien pätötehohuippujen aikana

kompensointiteho ei riitä. 500 kW:n tehoilla kompensointi käy välillä kapasitiivisella-kin puolella.

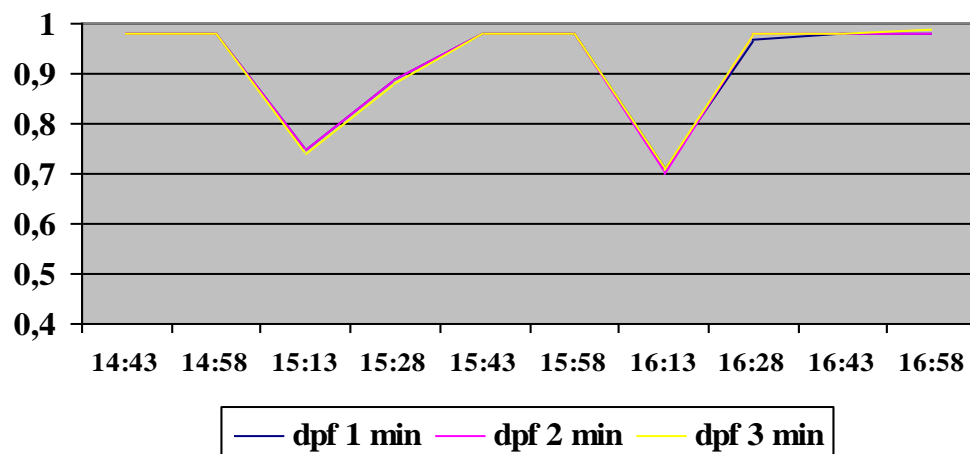
### Pätö- ja loistehohuiput



**KAAVIO 23. Pätö- ja loistehohuiput PK 4:ssä**

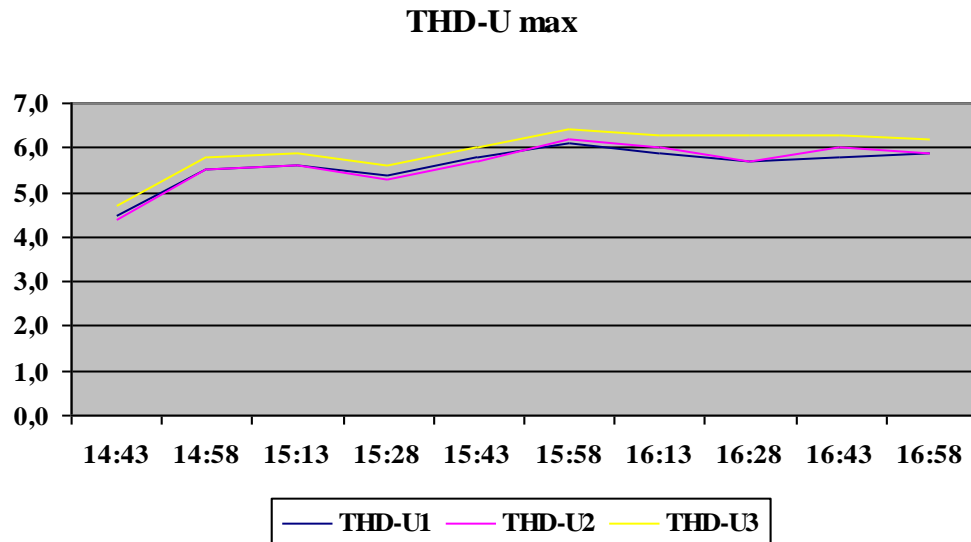
Kaaviossa 24 on esitetty vertailun vuoksi mittarin mittaamat tehokertoimien minimit eri vaiheilla. Kuten kaaviosta käy ilmi, tehokertoimet romahtavat kuormitushuippujen aikana.

### Dpf minimit

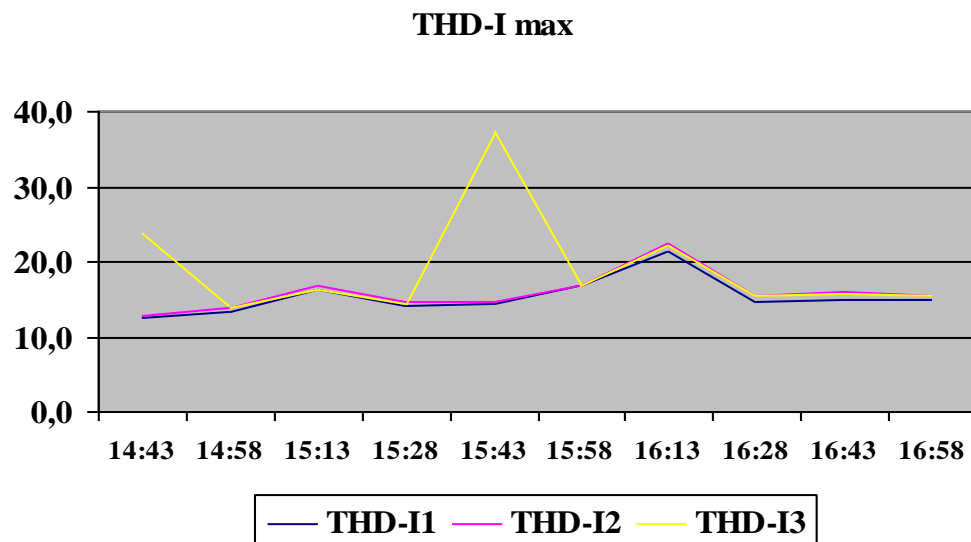


**KAAVIO 24. Tehokertoimien minimit pääkeskus PK 4:ssä**

Kaavioissa 25 ja 26 on esitetty jännite- ja virtasäröt vaiheittain pääkeskuksessa PK 4. Jännitesäröt ylittävät suositellun 3 prosenttia, mutta pysyvät alle vaaditun 8 prosentin. Virtasäröt ylittävät 8 prosentin rajan jatkuvasti.



**KAAVIO 25. Jännitteen kokonaissärö THD-U pääkeskuksessa PK 4**



**KAAVIO 26. Virran kokonaissärö THD-I pääkeskuksessa PK 4**

### 8.5 Yhteenveto loistehon osalta

Verkkoyhtiöt laskuttavat loistehon käytöstä huipputehon mukaan. Yleensä sopimukseen kuuluu jonkinlainen ilmaisosuus loistehoa, joka on suhteutettu pätötehon kuluutukseen. Loistehon ilmaisosuus on usein 20 % pätötehohuipun määrästä, kuten Järvi-Suomen Energialla. Laskutettava loistehon määrä saadaan Jaatisen mukaan (1991, 51) kaavasta 17

$$Q_{\text{LASK}} = Q_{\text{MAX}} - K * P_{\text{MAX}} \quad (17)$$

jossa

$Q_{LASK}$  = laskutettava loisteho [kVar]

$Q_{MAX}$  = loistehon huippuarvo [kVar]

$P_{MAX}$  = pätötehon huippuarvo [kW]

$K$  = sähkölaitoskohtainen kerroin 0,5 – 0,2 [kVar / kW].

Loistehon kompensoinnin lisätarve voidaan laskea eri tavoilla. Yksi esimerkki on käyttää liitteestä 1 saatavaa kerrointa, jolla kerrotaan pätötehuippu. Kerroin saadaan kun tiedetään nykyinen tehokerroin, jonka jälkeen katsotaan samalta riviltä halutun tehokertoimen kohdalta vaadittu kerroin, jolla kerrotaan pätötehuippu. Vaadittava kompensointiteho saadaan siten kaavan 18 mukaan

$$Q_{komp} = f * P_h \quad (18)$$

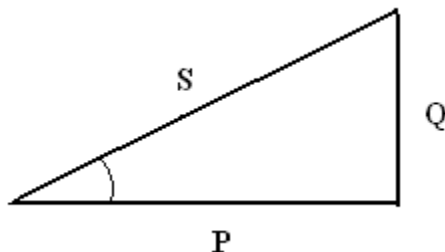
jossa

$Q_{komp}$  = tarvittava kompensointiteho [kVar]

$f$  = taulukosta saatava kerroin

$P_h$  = pätötehuippu [kW].

Nykyisenä tehokertoimenä on käytetty tehokerrointa, joka on saatu jakamalla muuntamon keskimääräinen loisteho keskimääräisellä pätöteholla. Tästä saadaan  $\tan\phi$ , joka on muutettu kulman kautta  $\cos\phi$ :ksi. Kuvassa 25 on esitetty näennäistehon  $S$ , pätötehon  $P$  ja loistehon  $Q$  suhde toisiinsa.



**KUVA 25. Tehojen suhde toisiinsa**

Taulukossa 5 on esitetty pääkeskuskohtaisesti pätötehohuiput, loistehohuiput, loistehon ilmaisosuus, sekä loistehomaksut mittausotantojen perusteella pääkeskuskohtaisesti. Taulukossa täytyy huomioda, että pääkeskus PK 2.1 syöttää pääkeskus PK 2:ta, joten pääkeskus PK 2.1 on merkitsevä keskus. Lisäksi on muistettava, että todelliseen loistehomaksuun vaikuttaa kaikki muuntamot yhdessä, joten loistehohuiput eivät satu samanaikaisesti, kuten eivät myöskään pätötehohuiput. Loistehomaksu on Järvi-Suomen Energialla 4,45 € / kVar / kk.

#### TAULUKKO 5. Loistehomaksut pääkeskuskohtaisesti

Pääkeskus	PK 1	PK 2	PK 2.1	PK 3	PK 4
<b>Pätötehohuippu kW</b>	464	662	1014	876	799
<b>Loistehohuippu kVaria</b>	443	669	738	570	739
<b>Loistehon ilmaisosuus kVaria</b>	93	132	203	175	160
<b>Maksettava osuus kVaria</b>	350	537	535	395	579
<b>Maksettava osuus euroa</b>	1558	2388	2382	1757	2577

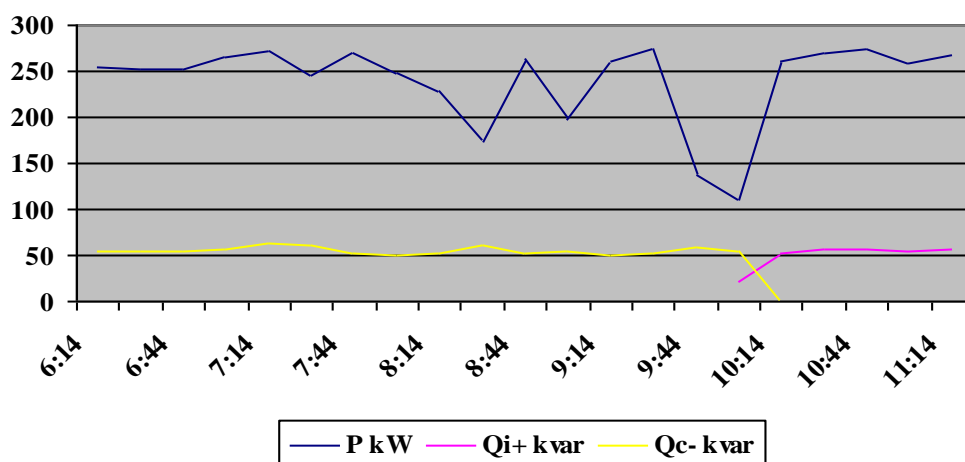
Taulukossa 6 on esitetty muuntamokohtaisesti pätötehohuiput, loistehohuiput, loistehon ilmaisosuus sekä loistehomaksut mittausotantojen perusteella.

#### TAULUKKO 6. Loistehomaksut muuntamokohtaisesti

Muuntamo	T1	T2	T3	T4
<b>Pätötehohuippu kW</b>	464	1014	876	799
<b>Loistehohuippu kVaria</b>	443	738	570	739
<b>Loistehon ilmaisosuus kVaria</b>	93	203	175	160
<b>Maksettava osuus kVaria</b>	350	535	395	579
<b>Maksettava osuus euroa</b>	1558	2382	1757	2577

Muuntamolla T1 loistehon kompensointi on melko hyvässä kunnossa, loistehon kompensointi on jopa enimmäkseen kapasitiivisella puolella. Laitteiden samanaikainen käynnistys tauon jälkeen aiheutti induktiivisen loistehohuipun, joka jopa ylitti sen hetkisen pätötehohuipun. Muuntamolle ei tarvita lisäkompensointia, mutta kompensointiyksikön uudistus olisi tarpeen, koska säädin ei tunnu pelaavan kunnolla.

### Päto- ja loistehon keskiarvot T1



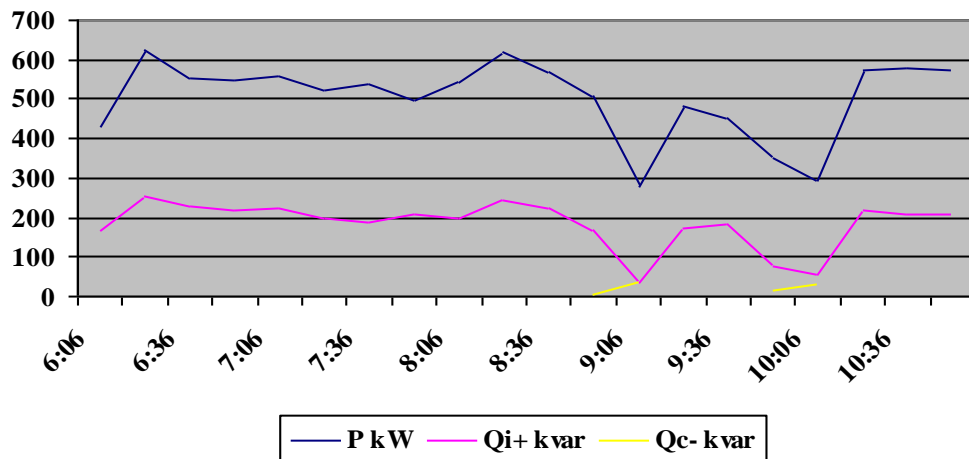
### KAAVIO 27. Päto- ja loistehon keskiarvot muuntajalla T1

Muuntamolla T2 loistehon kompensointi on riittämätön, lisäksi laitteiden yhteiskäynnistys ilmeisesti aiheuttaa loistehon kulutukseen piikkejä. Muuntamon T2 keskimääräinen tehokerroin oli 0,939. Moottorien kompensointiaite pyritään Jaatisen mukaan (1991, s.97) rajoittamaan  $\cos\varphi \leq 0,98$  kondensaattorien aiheuttaman haitallisen ylijännitteen vuoksi. Kaavan 18 ja liitteen 1 taulukosta saatavan kertoimen mukaan voidaan lisäkompensoinnin tarve laskea siten seuraavasti

$$Q_{\text{komp}} = f * P_h = 0,16 * 1014 \text{ kW} = 162 \text{ kVaria.}$$

Muuntaja T2 syöttää pääkeskusta PK 2.1, joka taas syöttää pääkeskus PK 2:ta. Taulukon 5 mukaan lisäkompensoinnista suurin osa tulisi sijoittaa pääkeskus PK 2:een. Tässä yhteydessä on syytä muistaa, että pääkeskus PK 2.1 toinen 75 kVarin kondensaattoriparisto on todennäköisesti viallinen. Jos tämä paristo olisi kunnossa, jäisi kompensoitavaa tehoa 87 kVaria, joka taulukon 5 mukaan tulisi sijoittaa pääkeskus PK 2:een. Kaaviossa 28 on esitetty muuntajan T2 keskimääräiset päto- ja loistehon kulutukset.

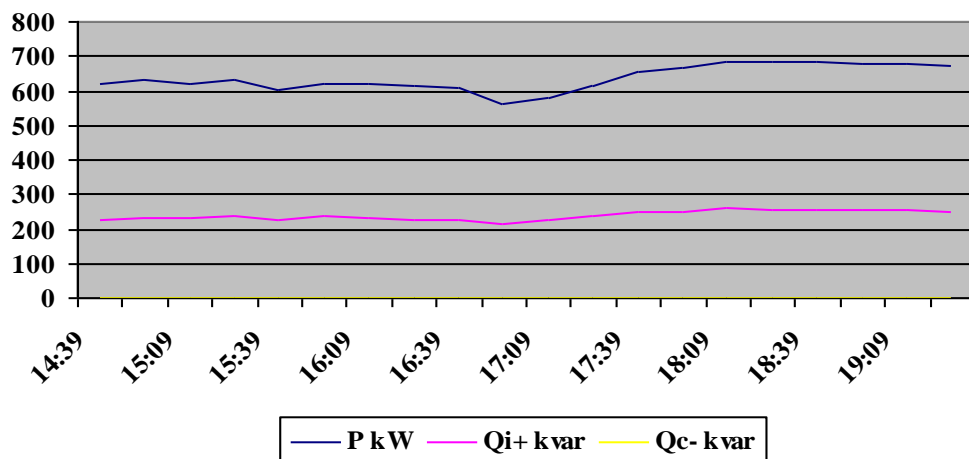


**Pätö- ja loistehon keskiarvot T2****KAAVIO 28. Pätö- ja loistehon keskiarvot muuntajalla T2**

Muuntajan T3 keskimääräinen tehokerroin oli 0,936 joten lisäkompensointi olisi tarpeen. Myös muuntamolla T3 laitteiden yhteiskäynnistys aiheuttaa loistehon kulutukseen piikkejä. Kaavan 18 ja liitteen 1 taulukosta saatavan kertoimen mukaan voidaan lisäkompensoinnin tarve laskea seuraavasti, kun tehokertoimeksi halutaan 0,98.

$$Q_{\text{komp}} = f * P_h = 0,16 * 876 \text{ kW} = 140 \text{ kVaria.}$$

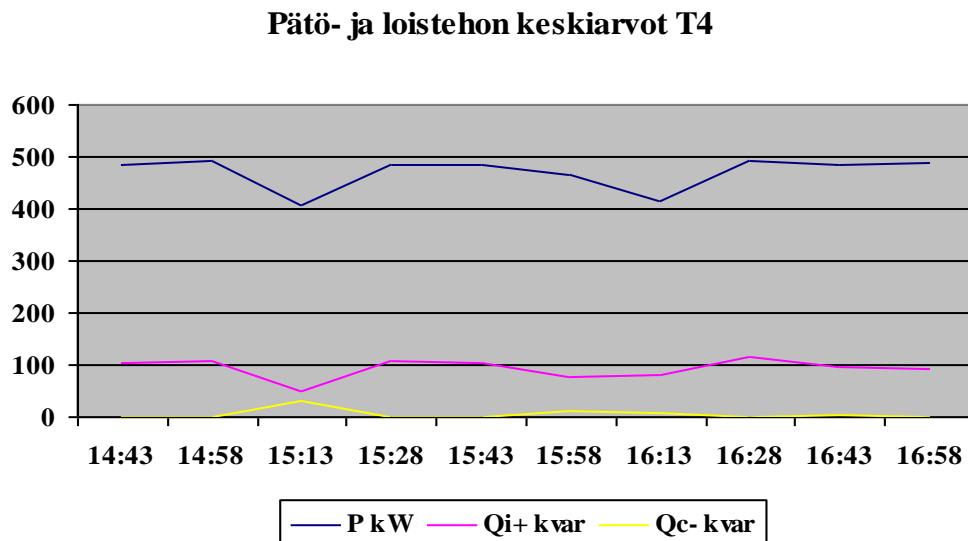
Kaaviossa 28 on esitetty pätö- ja loistehokulutuksen keskiarvot muuntamolla T3. Loistehon kulutus on pelkästään induktiivisella puolella jatkuvasti.

**Pätö- ja loistehon keskiarvot T3****KAAVIO 29. Pätö- ja loistehon keskiarvot muuntajalla T3**

Muuntamon T4 keskimääräinen tehokerroin keskimääräisistä pätö- ja loistehosta laskettuna on 0,981, joka on hyvä. Mutta jos tehokerroin lasketaan vaihekohtaisesti jakamalla keskimääräinen pätöteho keskimääräisellä virralla ja – jännitteellä, jää tehokerroin 0,975:een, jolloin kompensointitehoa voisi vielä hieman lisätä.

$$Q_{\text{komp}} = f * P_h = 0,02 * 799 \text{ kW} = 16 \text{ kVaria.}$$

Lisäkompensoinnin tarve ei ole suuri, joten se on helppo toteuttaa vaikka kiinteällä paristolla keskuksen kiskostoon asennettuna, mutta se pienentäisi käynnistysten aiheuttamia huippuja osaltaan. Kaaviossa 30 on esitetty muuntamo T4:n pätö- ja loistehokulutuksen keskiarvot.



**KAAVIO 30. Pätö- ja loistehon keskiarvot muuntajalla T4**

## 8.6 Kompensointitehon lisäys

Loistehon kompensoinnin lisäys voidaan toteuttaa monella tavalla. Halvimpia ratkaisuja on kytkeä pieniä kiinteitä kondensaattoreita moottorien käynnistimien liittimiin, tai suurempia kiinteitä paristoja keskuksien kiskostoihin. Mutta koska jokaisessa muuntamossa jännite- ja virtasäätö olivat reilusti yli suositellun kolme prosenttia, tulisi mielestäni harkita koko kompensoinnin uusimista ja korvaamista estokelaparistoilla, tai jopa tarvittaessa yliaaltosuodattimilla eli imupiireillä. Uusilla estokelaparistoilla tapahtuva yliaaltojen suodattaminen vähentäisi varmasti sahalla tapahtuvia näyttöjen ja muiden elektronisten laitteiden särkymisiä.

Muuntamoittain lisäkompensoinnin toteutus olisi tärkeintä aloittaa muuntamoista T2 ja T3. Näissä muuntamoissa tehokerroin oli heikoin. T1:ssä tehokerroin oli hyvä, mutta kompensoinnin säätölaitteisto ei toiminut kunnolla. T4:ssä tehokerroin oli hyvä, mutta yliaaltoja oli paljon. Ainoastaan muuntamossa T3 yliaallot olivat alle 8 prosenttia, mutta suositeltu raja on 3 prosenttia. Estokelaparisto kannattaisi asentaa ensin esimerkiksi muuntamon T2 perään, ja korvata vanhat kondensaattoriparistot ja säädin. Uudet nykyaikaiset kompensointiyksiköt ovat varustettu näyttöpaneeleilla, joista voi seurata kompensoinnin toimivuutta näytössä näkyvän tehokertoimen avulla. Tästä on helppo havaita mahdollisten etusulakkeiden tai paristojen vaurioituminen nopeasti.

Pätöteho- ja loistehohuiput eivät satu eri muuntamoilla samaan aikaan, mutta mikäli näin kävisi, olisi näiden neljän muuntajan pätötehohuippu mittausten perusteella 3153 kW ja loistehohuippu 2490 kVaria. Tästä loistehon ilmaisosuus olisi 631 kVaria, joten maksullinen loistehon kulutus olisi 1859 kVaria. Kun loistehon hinta on 4,45 € / kVARI, tekisi se kuukauden loistehomaksuksi 8273 euroa. ja vuositasolla 99 276 €.

Samanaikaiset huiput eivät ole kovin realistisia toteutua, mutta näistä laskelmista puuttuu vielä muuntamo T5, jonka estokelaparistosta oli palanut sulakkeita, särkynyt kontaktoreita ja useita paristoja. Tämän muuntamon tehokerroin oli paneelin mukaan välillä 0,84. Koska sahalla tauot eri osastoilla pidetään samaan aikaan, on täysin mahdollista, että useammalla muuntajalla tehopiikit sattuvat juuri samaan aikaan. Silloin 8 000 euron kuukausittainen loistehomaksu on jo todennäköistä toteutua. Lisäksi täytyy muistaa, että talvella ainakin muuntamoiden T1 ja T2 kuormitus kasvaa jonkin verran, jolloin myös loistehohuiput kasvavat. Kesäkuussa 2011 loistehon maksullinen osuus oli 908 kVaria, joka tekee 4 041 euroa.

Rahallisesti kompensoinnin parantaminen tekee säästöjä myös pätötehon kulutuksen pienenemisen kautta. Loistehon kulutus lisää virran kulutusta, koska muuntajien kuormitusvirta lasketaan näennäistehosta, joka sisältää myös loistehon. Esimerkiksi kun muuntamon T2 pätöteho huippu oli 1014 kW:a, oli loistehohuippu 601 kVaria. Maksimivirta nykykompensoinnilla saadaan laskettua kaavan 2 mukaan, kun korvataan näennäisteho S pätötehon P ja loistehon Q vektoreiden summalla.

$$I_{\max 1} = \sqrt{(P^2 + Q^2)} / (\sqrt{3} * U) = \sqrt{(1014^2 + 601^2)} / (\sqrt{3} * 400) = 1,70 \text{ kA}$$

Mikäli loistehokomponentti puuttuisi kokonaan, tulisi maksimivirraksi vain

$$I_{\max 2} = P / (\sqrt{3} * U) = 1014 / (\sqrt{3} * 400) = 1,44 \text{ kA}$$

Eroa on siis 260 ampeeria, mikä tekisi tehosäästökseen yhteensä 104 kW. Tämä erotus on laskettu huipputehosta, eikä todellisuudessa loistehokomponenttia saa kokonaan pois. Taulukossa 7 on esitetty lisäkompensoinnilla saavutettava keskimääräinen kuormitusvirran alenema ja siitä johtuva pätötehon säästö vuodessa. Muuntajan T2 mittauksista on jätetty kolme mittaushetkeä pois, koska niihin on sattunut sahauslinjalta seisokki, ja tämän vuoksi keskiarvo on vääristynyt pienempään suuntaan. Muuntajia T2 ja T3 kuormitetaan vuodessa 220 päivää ja muuntajaa T4 335 päivää.

Todellisuudessa säästöt olisivat suurempia, sillä talvella tehonkulutus nousee jonkin verran ja muuntajat T2 ja T3 ovat muutenkin osittain kuormitettuina myös muina vuorokauden tunteina ja vuoden jokaisena päivänä, mitä taulukossa on esitetty. Taulukossa esitetyillä luvuilla vuosittainen säästö olisi siis yli 318 000 kWh.

**Taulukko 7. Muuntamoiden alentuneet virrankulutukset ja pätötehot**

<b>Muuntamo</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>Yksikkö</b>
<b>Keskimääräinen pätötehokulutus</b>	240	539	637	470	<b>kW</b>
<b>Keskimääräinen loistehokulutus</b>	50	206	239	93	<b>kVar</b>
<b>Lisäkompensointitavoite</b>	-	162	140	16	<b>kVar</b>
<b>Nykyinen kuormitusvirran k-a</b>	354	833	982	692	<b>A</b>
<b>Kuormitusvirta lisäkompensoinnin jälkeen</b>	354	781	930	687	<b>A</b>
<b>Kuormitusvirran aleneminen</b>	-	52	52	5	<b>A</b>
<b>Tavoite tehokerroin</b>	0,98	0,98	0,98	0,98	
<b>Tehonsäästö</b>	-	35,3	35,3	3,4	<b>kW/h</b>
<b>Tunteja vuorokaudessa</b>		17,5	20	24	<b>h</b>
<b>Säästö vuodessa</b>	-	135905	155320	27336	<b>kWh</b>

## 9 POHDINTA

Työ tehtiin Versowood Oy:n Otavan Sahalla, joka on 20 kV:n suurasiakas. Työn tarkoituksena oli selvittää suurien loistehomaksujen syitä. Loistehomaksut ovat vaihdelleet kuukausittain suurestikin, mutta lasku on ollut jatkuvasti kasvamaan päin. Työssä oli alun perin tarkoitus keskittyä vain muuntajien T1 ja T2 loistehokulutuksen selvittämiseen, mutta mukaan otettiin työn edetessä myös muuntajat T3 ja T4. Myös muuntaja T5 olisi mitattu, mutta mittauksien aikaan kaikki muuntajan syöttämät laitokset eivät olleet käytössä. Lisäksi muuntajan T5 syöttämässä pääkeskuksessa olevasta estokelaparistosta oli vioittunut useita paristoja, eikä niitä saatu hankittua tilalle ajoissa.

Mittaustulosten perusteella sahan neljästä mitatusta pääkeskuksesta kaksi tarvitsee lisäkompensointia pikaisesti. Muuntajien T1 ja T4 syöttämien pääkeskuksien kompensoinnit olivat melko lailla kohdallaan, muuntajan T1 syöttämän pääkeskuksen kompensointi oli jopa kapasitiivisella puolella suurimmaksi osan aikaa. Silti kaikissa pääkeskuksissa tuli esille sama ongelma: pätötehohuippujen aikana myös loistehohuiput nousivat erittäin suuriksi. Loistehomaksut taas määräytyvät huippujen mukaan, jolloin pelkkä loistehon kompensointi ei välttämättä auta loistehomaksujen alenemiseen riittävästi. Jotta suuret huiput saataisiin pois, täytyisi laitteiden käynnistyä hieman eri aikaan, varsinkin suurien moottoreiden.

Kaikissa muuntamoiden pääkeskuksissa jännite- ja virtasäröt olivat reippaasti yli suositeltavan rajan, varsinkin särövirrat ylittivät raja-arvot suuresti. Tämän vuoksi lisäkompensoinnin toteutus tulisi suorittaa estokelaparistoilla tai jopa kahdessa pääkeskuksessa saattaisi olla tarvetta käyttää yliaaltojen imupiirejä eli yliaaltosuodattimia. Varsinkin muuntajien T1 ja T2 virran harmoniset yliaallot olivat erittäin suuret, jolloin näiden pääkeskuksien kohdalla yliaaltosuodattimet voisivat olla järkevä vaihtoehto. Muuntajan T3 särövirrat olivat vielä alle sallittujen raja-arvojen, mutta ylittivät suositeltavan raja-arvon. Muuntajan T4 arvot vaihtelivat suuresti eri mittausjaksojen aikana, joten pidemmällä tähtäimellä kompensointia uudistaessa estokelaparisto olisi tähänkin pääkeskukseen sopiva ratkaisu.

Loistehon kompensoinnilla saadaan säästöjä monella tavalla. Ensimmäisenä näkyvänä säästönä tulee loistehomaksujen pieneneminen, mutta loistehon kompensointi vähentää myös virrankulutusta. Muuntajan teho on aina näennäistehoa, joka sisältää loiste-

ho-osan ja pätöteho-osan. Kun kuormitusvirrasta poistetaan loistehokomponentti, verkon pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa, jolloin kokonaisvirrat pienenevät, mikä pienentää pätötehon häviöitä. Tämän seurauksena pätötehoa kuluu vähemmän, jolloin säästöä syntyy sekä vähentyneestä energiamaksusta että siirtomaksusta. Loistehon vähentäminen siirtoverkosta vähentää myös laitteiden kuumentumista, mikä taas tuo lisää energiasäästöjä. Yliaaltojen poistaminen taas vähentää laitevaurioita sekä vähentää laitteiden lämpenemistä, sillä tietyillä yliaaltojen taajuuksilla on esimerkiksi moottorin pyörintää vastustava tai lisäävä voimavaikutus.

Lopuksi täytyy muistaa, että toteutetaanpa loistehon kompensointi minkä laajuisena tahansa tai millä laitteilla tahansa, ei sillä ole lopuksi mitään merkitystä, ellei laitteita tarkasteta ja huolleta säännöllisesti. Kaikenlaiset kompensointilaitteet ovat turhia, jos osa niiden etusulakkeista tai osa paristoista on palanut. Tätä työtä tehdessä todettiin lähes jokaisessa pääkeskuksessa jonkin kompensointilaitteen toiminnan olevan osittain tai kokonaan pois pelistä joko sulakepalon, paristovaurion tai kontaktorivian takia. Kompensointilaitteille tulisi tehdä säännölliset tarkastukset tietyin aikavälein ja kirjata tulokset kirjallisesti ylös.

## LÄHTEET

- Ahoranta Jukka, 1998. Sähkötekniikka. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.
- Aura Lauri, Tonteri Antti J. 1986. Sähkömiehen käsikirja 2, Sähkökoneet. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.
- Aura Lauri, Tonteri Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.
- Elovaara Jarmo, Haarla Liisa 2011. Sähköverkot 1, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Tallinna Raamatutrükikoda: Otatieto.
- Elovaara Jarmo, Haarla Liisa 2011. Sähköverkot 2, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Tallinna Raamatutrükikoda: Otatieto.
- Elovaara Jarmo, Laiho Yrjö 1988. 5.p. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Valopaino.
- Hieta-Wilkman Sinikka, Jumpponen Eino, Kovalainen Sulo, Männistö Matti, Roinen Raimo, Rauhala Hannu, Salo Touko, Seesvuori Reino, Sulonen Risto, Taimisto Samuli, Tiainen Esa 2006. Sähköasennukset 2. Tampere: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.
- Jaatinen Juhani 1991. Pienjänniteverkon kompensointi. Helsinki: Sähköurakoitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy.
- Suur-Savon Sähkö, Järvi-Suomen Energia 11/2010. Verkkopalvelu- ja sähköenergiatuotteiden hinnat 1.1.2011 alkaen [verkkodokumentti]. Luettu 8.8.2011. <http://www.digipaper.fi/suursavonsahko/55534/>
- Lohjala Juha 2005. Haja-asutusalueiden sähkönjakelujärjestelmien kehittäminen – erityisesti 1000 V jakelujännitteen mahdollisuudet. Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Digipaino.
- Metrel Power Quality Analyser-Plus MI 2291 -mittarin käyttö-ohje 2000-2007. Ladattu verkkosivulta: <http://www.metrel.si/downloadcenter.....>7.6.2011.
- Männistö Matti, Hietalahti Lauri, Seesvuori Reino, Seesvuori Vesa, Wilen Tarmo 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.
- Nokian Capacitors Ltd 2011. Tuotteet, kompensointi [verkkodokumentti]. Päivitetty 7.5.2011. Luettu 5.7.2011. <http://www.nokiancapacitors.fi/systems.htm>

Kompensoinnin tehokerroin taulukko (Jaatinen1991, 92)

Nykyinen	Tavoiteltu cosφ >>kerroin f						
cosφ	0,80	0,85	0,90	0,92	0,95	0,98	1,00
0,70	0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02
0,71	0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99
0,72	0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96
0,73	0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94
0,74	0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91
0,75	0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88
0,76	0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86
0,77	0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83
0,78	0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80
0,79	0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78
0,80		0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75
0,81		0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72
0,82		0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70
0,83		0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67
0,84		0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65
0,85			0,14	0,19	0,29	0,42	0,62
0,86			0,11	0,17	0,26	0,39	0,59
0,87			0,08	0,14	0,24	0,36	0,57
0,88			0,06	0,11	0,21	0,34	0,54
0,89			0,03	0,09	0,18	0,31	0,51
0,90				0,06	0,16	0,28	0,48
0,91				0,03	0,13	0,25	0,46
0,92					0,10	0,22	0,43
0,93					0,07	0,19	0,40
0,94					0,03	0,16	0,36
0,95						0,13	0,33